

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN
DESTILADOR SOLAR TIPO CASETA DE GRAN SECCIÓN
TRANSVERSAL**

RODRIGO SALGADO AYALA

TESIS DE MAESTRÍA

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE

POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

MAESTRO EN INGENIERÍA

[ENERGÉTICA]

CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM, JUNIO 1996.



DEPA

T. UNAM

1 9 9 6

SAL

Ej. 2

Resumen

En este trabajo se caracteriza un destilador solar tipo caseta de gran sección transversal que mide 10 m de largo y 5 m de ancho, el área efectiva de captación es de 46.5 m² con un ángulo de inclinación en las cubiertas de 45°. El vértice del destilador se orienta en la dirección norte-sur.

Se ensayaron tirantes de 2, 4 y 6 cm de altura del agua a destilar. Durante las pruebas experimentales se midió la temperatura exterior e interior de las secciones superior e inferior de las cubiertas orientadas al este y oeste; en el piso del destilador y en la superficie del agua. Al mismo tiempo, se registró la temperatura ambiente, la radiación solar global incidente, la cantidad de destilado y la velocidad del viento. Además, se colocaron termopares a diferentes alturas en el interior del destilador con el fin de medir el espesor de la capa límite térmica.

Como resultado de las pruebas se calculó que la eficiencia promedio del destilador es de aproximadamente 25 %, la cual presenta una fuerte dependencia de la inercia térmica del destilador. Por otro lado, se observó que la temperatura es igual en la sección inferior y superior del destilador en las caras este y oeste, lo que sugiere que el flujo de calor a través de las cubiertas es de la misma magnitud en ambas secciones. Con respecto a las producciones de destilado, debido al efecto de la inercia térmica, durante el periodo nocturno se obtiene hasta 50% de la producción diaria. Los valores promedio de los números de Rayleigh y Nusselt fueron de 8.2×10^{10} y 144, respectivamente.

Nomenclatura

A	Área, m ²
cp	Calor específico a presión constante, J kg ⁻¹ K ⁻¹
d	Espesor, m
g	Aceleración de la gravedad, 9.81 m s ⁻²
G	Radiación solar incidente, W m ⁻²
Gr	Número de Grashof, adimensional
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor, W m ⁻² K ⁻¹
h _m	Coefficiente convectivo de transferencia de masa, m s ⁻¹
k	Conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹
l	Altura, m; litro
L	Longitud, m
Le	Número de Lewis, adimensional
M	Peso molecular, kg kmol ⁻¹
m	Masa, kg
m ^{''}	Flux másico, kg m ⁻² s ⁻¹
n	Índice de refracción, adimensional
Nu	Número de Nusselt, adimensional
p	Presión parcial, Pa
Pr	Número de Prandtl, adimensional
q	Flux de energía calorífica, W m ⁻²
Q	Flujo de energía calorífica, W
R	Constante universal de los gases, 8.315 x 10 ³ J kmol ⁻¹ K ⁻¹
Ra	Número de Rayleigh, adimensional
Sr	Factor de esbeltez de la inercia térmica, adimensional.
t	Tiempo, s
T	Temperatura, °C
T'	Temperatura, K
ΔT'	Diferencia de temperatura modificada, K
V	Velocidad del viento, m s ⁻¹
W	Ancho, m

Letras griegas

α	Difusividad térmica, m ² s ⁻¹ ; absortancia media hemisférica, adimensional
β	Inclinación de la cubierta, °
β'	Coefficiente volumétrico de expansión térmica, K ⁻¹
Δ	Diferencia.
ε	Emisividad hemisférica, adimensional
Φ	Productividad del destilador solar, kg m ⁻² día ⁻¹
η	Eficiencia del destilador solar, adimensional
φ	Ángulo de refracción, °
λ	Calor latente de vaporización, J kg ⁻¹

ν	Viscosidad cinemática, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
θ	Ángulo que forman en el instante t la dirección de la radiación solar directa y la normal al plano de interés, $^\circ$
$\Delta\theta$	Periodo de medición, 24 h
ρ	Densidad, kg m^{-3} ; reflectancia, adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5.6695 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
τ	Transmitancia total, adimensional
τ'	Fracción de energía absorbida, adimensional
τ''	Transmitancia limitada por la reflexión, adimensional

Subíndices

a	Ambiente; condición de energía absorbida
am	Media aritmética
c	Convección
d	Condición difusa
e	Evaporación
f	Firmamento
h	Superficie horizontal
i	Aire
m	Condición de transferencia de masa
max	Máximo.
o	Oriente
p	Piso de concreto
P	Poniente
r	Radiación; condición de energía radiada
s	Suelo
t	Tirante; condición de energía transmitida
u	Agua
v	Vidrio
vu	Vapor de agua

Contenido

RESUMEN	I
NOMENCLATURA	II
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
OBJETIVOS	15
<i>Objetivo general</i>	<i>15</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
ANÁLISIS MATEMÁTICO	16
<i>Balance de energía en la cubierta del destilador</i>	<i>17</i>
<i>Balance de energía en la superficie del tirante</i>	<i>20</i>
<i>Balance de energía en el piso del destilador</i>	<i>22</i>
METODOLOGÍA	23
<i>Descripción del destilador solar</i>	<i>23</i>
<i>Instrumentación</i>	<i>24</i>
<i>Descripción de las pruebas experimentales</i>	<i>24</i>
RESULTADOS	30
<i>Prueba 1: tirante de 2 cm.</i>	<i>30</i>
<i>Prueba 2: tirante de 4 cm.</i>	<i>38</i>
<i>Prueba 3: tirante de 6 cm.</i>	<i>44</i>
<i>Prueba 4: tirante de 4 cm, medición de temperaturas en nivel superior de la cara este.</i>	<i>51</i>
<i>Prueba 5: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel inferior de la este.</i>	<i>52</i>
<i>Prueba 6: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel superior de la cara oeste.</i>	<i>53</i>
<i>Prueba 7: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel inferior de la cara oeste.</i>	<i>54</i>
<i>Prueba 8: tirante 4 cm, medición de temperaturas en la sección central del destilador.</i>	<i>55</i>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60

Figuras

Figura 1. Esquema de los flujos de energía en un destilador solar.	16
Figura 2. Dibujo esquemático y fotografía del destilador.	23
Figura 3. Puntos de medición de temperatura para las pruebas con tirante de 2, 4 y 6 cm.	24
Figura 4. Diagrama esquemático del procedimiento utilizado para realizar las pruebas experimentales.	25
Figura 5. Ubicación de los termopares en las pruebas 4 y 6.	27
Figura 6. Ubicación de los termopares en las pruebas 5 y 7.	28
Figura 7. Ubicación de los termopares en la prueba número 8.	28
Figura 8. Producción total de destilado durante la prueba 1.	30
Figura 9. Radiación solar incidente durante la prueba 1.	31
Figura 10. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 1.	31
Figura 11. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 1.	32
Figura 12. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles de la cara este durante la prueba 1.	33
Figura 13. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles de la cara oeste durante la prueba 1.	34
Figura 14. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de la cara este y oeste durante la prueba 1.	35
Figura 15. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 1.	36
Figura 16. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste durante la prueba 1.	36
Figura 17. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste durante la prueba 1.	37
Figura 18. Producción total de destilado durante la prueba 2.	38
Figura 19. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 2.	39
Figura 20. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 2.	39
Figura 21. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara este durante la prueba 2.	40
Figura 22. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara oeste durante la prueba 2.	41
Figura 23. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de ambas caras durante la prueba 2.	41

Figura 24. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 2.	42
Figura 25. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 2.	43
Figura 26. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 2.	43
Figura 27. Producción total de destilado durante la prueba 3.	44
Figura 28. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 3.	45
Figura 29. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 3.	45
Figura 30. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara este durante la prueba 3.	46
Figura 31. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara oeste durante la prueba 3.	47
Figura 32. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de ambas caras durante la prueba 3.	47
Figura 33. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 3.	48
Figura 34. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 3.	49
Figura 35. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 3.	50
Figura 36. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 4.	51
Figura 37. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 4.	52
Figura 38. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 5.	52
Figura 39. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 5.	53
Figura 40. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 6.	54
Figura 41. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 6.	54
Figura 42. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 7.	55
Figura 43. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 7.	55
Figura 44. Perfil de temperaturas registradas en los termopares en la prueba 8.	56
Figura 45. Radiación solar incidente durante la prueba 8.	56
Figura 46. Variación de la temperatura en la parte inferior del destilador.	56
Figura 47. Relaciones adimensionales de producción y radiación para los tres tirantes ensayados.	57

Tablas

Tabla 1. Datos de funcionamiento del destilador para los tirantes ensayados	50
Tabla 2. Datos de funcionamiento del destilador para las pruebas 4, 5, 6, 7 y 8.	53

Introducción

La destilación solar es una de las más antiguas técnicas utilizadas para obtener agua para consumo humano o uso agrícola a partir de agua salina o salobre (Adhikari *et al*, 1990). Se puede encontrar en la literatura sobre el tema que se han realizado grandes esfuerzos para mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas, de tal suerte que es posible obtener agua destilada a un costo razonable y utilizar una mínima extensión de tierra (Aghareed, 1992). Sin embargo, estos estudios se han enfocado principalmente al desarrollo de diseños novedosos de destiladores solares, mientras que los aspectos relacionados con los mecanismos básicos de transferencia de calor y masa han recibido una atención limitada.

Los destiladores solares consisten básicamente en una caseta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una superficie negra que contiene el agua a destilar. El funcionamiento general de estos dispositivos consiste en la exposición a la radiación solar del lecho de agua. De esta forma, el agua alcanza temperaturas más altas que el vidrio, el cual se enfría al ambiente por convección y radiación. La acción combinada de los mecanismos de transferencia de calor y masa obligan a que el vapor emigre desde el lecho hasta la cubierta en donde se condensa. El condensado escurre por la cubierta hacia la parte inferior y se recolecta con ayuda de canaletas construidas para ese fin.

En Baja California Sur, la escasez de agua adecuada para consumo humano y uso agrícola es una limitante para el desarrollo de la región. Así pues, conforme se hace costosa la obtención de agua en zonas áridas, tales como Baja California Sur, la opción de destilar agua de mar para consumo humano y uso agrícola se hace cada vez más atractiva. Los destiladores solares pueden proporcionar agua a un costo competitivo para comunidades pequeñas o familias, comparadas con alternativas que involucran el uso de combustibles fósiles, las cuales más bien se adaptan a aplicaciones en gran escala. Además, la destilación solar es preferida a otro tipo de procesos de destilación debido a que funciona con energía gratuita, es bajo el costo de operación, requiere poco mantenimiento y no involucra partes móviles (Yadav, 1990).

Existen en la literatura diversos modelos matemáticos de parámetros concentrados que ayudan a predecir la producción de un destilador solar (**Cooper, 1969b; Dunkle, 1961; Nayak et al, 1980; Morse y Read, 1968**). Sin embargo, es necesario realizar investigación que permita conseguir una mejor comprensión de los mecanismos mediante los cuales ocurre el transporte de vapor en el destilador, lo cual puede ayudar a formular o evaluar modelos matemáticos que ayuden en su diseño. Asimismo, las teorías que se formulen para describir estos mecanismos deben construirse sobre una base experimental sólida y rigurosa.

Este trabajo pretende contribuir conocimientos acerca de los mecanismos de transporte de vapor en destiladores solares tipo caseta con una alta inclinación y de gran sección transversal. Como resultado de este trabajo se podrán identificar con mayor precisión las variables de diseño y operación que determinan la eficiencia de estos dispositivos.

Antecedentes

La destilación solar es una técnica que posee una larga historia. Sin embargo, algunos autores consideran que el periodo moderno del desarrollo de la destilación solar se inició en 1872 con la instalación de destiladores solares tipo caseta en un sitio llamado Las Salinas, que se encuentra en la parte norte de Chile (Howe y Tleimat, 1974). El análisis bibliográfico que a continuación se presenta abarca un periodo de poco más de tres décadas y se inicia comentando el influyente artículo que publicó Dunkle (1961).

El artículo de Dunkle analiza un destilador solar tipo caseta y un destilador por etapas y señala que el destilador de múltiple efecto ofrece grandes perspectivas para la producción de agua potable a partir de aguas salinas en zonas áridas aisladas.

Dunkle realiza un análisis de parámetros concentrados en régimen permanente a un destilador solar tipo caseta con el fin de estudiar su funcionamiento y reconocer los elementos que pudieran mejorar su eficiencia. Para desarrollar su modelo Dunkle se basa en parte en los experimentos realizados por Sharpley y Boelter sobre la evaporación del agua en aire en reposo (Clark, 1990). En este artículo Dunkle señala que, aunque este tipo de destiladores se vienen utilizando desde hace mucho tiempo, la mayoría de las publicaciones eran más descriptivas que analíticas. El destilador utilizado por Dunkle para realizar su análisis presentaba las siguientes características: 2.16 m^2 , una pendiente de 10° y una profundidad de 0.15 m .

Dunkle apunta que para obtener la mayor producción de destilado, es necesario incrementar el calor transferido para la evaporación de agua. Para lograrlo es necesario incrementar el ingreso de energía y disminuir las pérdidas por conducción hacia el suelo.

Dunkle señala que en un espacio cerrado en el cual ocurren de manera simultánea la transferencia de masa y calor, la convección natural puede ser relacionada con los números de Nu y Gr. Para calcular la transferencia de calor por convección, Dunkle utiliza un número de Gr modificado que incluye entre sus términos las presiones de vapor a la temperatura del agua y de la cubierta. Se puede observar, al revisar el álgebra, que para el valor del número de Gr que se presenta en estos casos, el tamaño del destilador no afecta el valor del

coeficiente de transferencia de calor por convección. Una vez calculado el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección, al utilizar la analogía entre la transferencia de calor y la transferencia de masa, Dunkle calcula la transferencia de masa y calor por evaporación. Los valores obtenidos por Dunkle en su artículo son del orden de $3.2 \times 10^5 \leq Gr \leq 10^7$. La eficiencia de los destilador solares de caseta calculada por Dunkle fue de 57.7%.

V. A. Baum y R. Bairamov (1964) realizan un experimento para probar la hipótesis de que el movimiento de la mezcla aire-vapor en una cavidad triangular tiene una regularidad. Esta hipótesis, que enfatiza la característica regular de la circulación, es importante porque subraya que el proceso de enfriamiento y calentamiento (los procesos de evaporación y condensación, respectivamente) se realizan en una capa relativamente delgada de la mezcla aire-vapor cercana al agua y al vidrio.

El experimento de Baum y Bairamov se realizó bajo condiciones de régimen permanente. Dentro de una cavidad con geometría de triángulo rectángulo colocaron agua que fue calentada con una resistencia eléctrica; para controlar la temperatura de la superficie de condensación hicieron pasar agua a temperatura constante sobre dicha superficie. En los experimentos variaron la temperatura del agua y de la superficie de condensación dentro de un rango de 23.4 a 97.1°C y de 16.3 a 89°C, respectivamente. Los rangos del número de Grashof en la superficie de evaporación y de condensación fueron de 3.27×10^6 a 3×10^7 y de 3.78×10^6 a 4.17×10^7 , respectivamente.

Baum y Bairamov reportan que las isotermas cercanas a las superficies de evaporación y condensación se concentran en una capa delgada, lo cual atestigua el hecho de la presencia de una capa límite, el espesor de la cual disminuye con el incremento de la temperatura de la superficie de evaporación. Las capas límites varían de espesor, la mayor de 12 mm para una temperatura media en el interior de la cavidad de 61°C. Se observa que el fenómeno es bidimensional. Se apunta, además, que en la cavidad sólo las capas periféricas del medio participan en la transferencia de masa y calor. Asimismo, se aprecia que la temperatura en el centro de la cavidad se mantiene a una temperatura constante. Por ello y por el hecho de que la intensidad del movimiento de la mezcla está determinado por las

temperaturas de las superficies de evaporación y condensación; estas temperaturas son las utilizadas para calcular el número de Grashof.

De acuerdo a los resultados obtenidos en su experimento y en vista de que las capas límite se encuentran suficientemente separadas, Baum y Bairamov consideraron que los procesos de evaporación y condensación no pueden manejarse de manera independiente uno del otro. Así, concluyen que el único factor sustancial que toma parte en el proceso de transferencia de energía y masa es la circulación de la capa límite en un ciclo completo; el flujo inicialmente es calentado en la superficie del agua, luego se eleva y es enfriado al deslizarse por la superficie de condensación. Esta capa presenta una muy baja tasa de intercambio de calor y humedad con el espacio total. Por último, obtienen expresiones para calcular el número de Nusselt en la superficie de evaporación ($2.17 \times 10^6 < Ra < 1.78 \times 10^7$) y para la superficie de condensación ($2.35 \times 10^6 < Ra < 2.51 \times 10^7$). Finalmente, de la bibliografía del tema de destilación que fue revisada para el presente trabajo, sólo Baum y Bairamov reportan mediciones del espesor de la capa límite.

En 1968 R.N. Morse y W.R.W. Read presentan un método gráfico para analizar el funcionamiento de los destiladores solares de caseta, así como para predecir la producción de destilado bajo condiciones que varían de hora en hora durante el día. Para realizar su trabajo Morse y Read utilizan las relaciones desarrolladas por Dunkle y agregan a su análisis el término de almacenamiento térmico. De las gráficas desarrolladas por Morse y Read se observa que para una temperatura de cubierta dada a medida que se incrementa la temperatura del agua la transferencia de calor por evaporación aumenta. Cabe mencionar que las gráficas de Morse y Read se desarrollaron para destiladores con una pendiente reducida, como se desprende del hecho de que el valor de la relación entre el área de condensación y el área del vidrio considerada en los cálculos es de 0.89. Dentro de la discusión de su trabajo mencionan que la exactitud de su método es reducida.

P.I. Cooper (1969b) esboza un método de simulación numérica para analizar los procesos que se realizan en un destilador solar. En este método se emplea un enfoque de diferencias finitas para simular la transferencia de energía hacia y desde el suelo. Con base en sus resultados Cooper señala que cuando no se aísla la base del destilador la profundidad del

tirante de agua afecta muy poco a la productividad y que ésta se eleva en un 30% al colocarle ailar la base; que las mayores velocidades del viento y temperaturas ambiente aumentan el rendimiento del destilador en grado reducido; que las cubiertas dobles de vidrio reducen sensiblemente el rendimiento del destilador y, desde el punto de vista económico, ni éstas ni las elevadas pendientes de la cubierta se justifican y, finalmente, agrega que el efecto de algunos cambios sobre el funcionamiento del destilador se pueden pronosticar considerando el efecto originado por la diferencia entre la temperatura del agua y la cubierta.

Cooper (1972) utiliza las expresiones de Dunkle para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección y de masa. Cooper observa que a una determinada temperatura del agua y a distintas diferencias de temperatura entre el vidrio y el agua, el cambio de la fracción del calor utilizada para evaporar el agua no es muy grande y que los otros modos de transferencia (radiación, convección) actúan como amortiguadores. Los resultados obtenidos en este trabajo señalan que la tasa de evaporación disminuye al variar la pendiente de 0 a 45°. Cabe mencionar que se esperaba que al incrementar la pendiente se elevaría la productividad, debido al aumento de la diferencia de temperaturas entre el vidrio y el agua. Hay que señalar que las ecuaciones utilizadas por Cooper para calcular la transferencia de calor por convección no son sensibles a los cambios de la pendiente de la cubierta, son ecuaciones para la convección entre planos paralelos horizontales adaptadas a las condiciones presentes en un destilador.

En 1973 P.I. Cooper publica los resultados de un experimento en el cual se simulan las condiciones de operación de un destilador solar tipo caseta. Con este experimento busca examinar los modos de transferencia de energía y masa en el interior de un destilador sobre un amplio rango de condiciones de operación que incluyen fluxes de energía tanto internos como externos. Para obtener una expresión para la transferencia de masa a partir de los coeficientes convectivos, Cooper hace uso de la analogía entre estos modos de transferencia de calor y masa, la cual asume que la relación funcional entre los números de Sherwood, Grashof y Schmidt para la transferencia de masa en convección natural en un sistema dado es la misma que aquella existente entre los números de Nusselt, Grashof y Prandtl para la transferencia de calor por convección natural.

El experimento reportado por Cooper se realizó en un destilador de 1 m² de área en la base y con cubiertas con una pendiente de 20°. Este aparato estaba aislado con una capa de poliuretano de 64 mm. En el interior se colocó agua, la cual se calentaba por medio de una resistencia eléctrica capaz de disipar hasta 3.5 kW. Las cubiertas eran de cobre; sobre ellas fluía agua a una tasa "suficiente" para minimizar el incremento de la temperatura bajo "las más adversas" condiciones; lo anterior hace suponer que no se contaba con un sistema para mantener constante la temperatura sobre la cubierta. Se registraron, para cada prueba, la producción de destilado y las temperaturas del agua, la superficie del tirante, de la superficie interior y exterior de la cubierta y la correspondiente al ambiente, todo ello para una potencia de entrada determinada bajo condiciones de régimen permanente.

Entre las conclusiones que Cooper reporta se puede mencionar que al calcular el flux de calor entre la superficie de agua y la cubierta es posible, si el destilador tiene una pendiente reducida, utilizar la suposición de que la radiación se establece entre dos planos paralelos infinitos con un gas transparente entre ambos planos. Sin esta suposición se está obligado a calcular el factor de vista para obtener el flux de calor por radiación en el interior del destilador.

Para calcular el flux de calor por convección en el interior del destilador Cooper utiliza las relaciones de Dunkle. En este trabajo Cooper considera: "que bajo condiciones normales de operación el modo convectivo es el menos importante de los tres y es posible tolerar errores considerables en la estimación del valor absoluto de este modo de transferencia de calor". La anterior afirmación resulta sorprendente si consideramos que es a partir del cálculo del modo convectivo como se obtiene la transferencia de calor y masa debida a la evaporación.

Finalmente, Cooper obtiene una expresión para la transferencia de masa en un destilador en condiciones de régimen permanente y compara sus resultados con los que obtendría si utilizara la relación de Dunkle y encuentra que los resultados obtenidos con la expresión de éste último, para predecir tasas de transferencia de masa, concuerdan satisfactoriamente con los resultados experimentales obtenidos por él mismo.

En 1980 M.S. Sodha *et al* presentan un artículo en el cual se reporta el comportamiento térmico de un sistema que utiliza un destilador solar en el techo de un cuarto para controlar su temperatura interior y obtener, al mismo tiempo, agua destilada. Cabe mencionar que los resultados reportados fueron obtenidos por simulación numérica. El tipo de análisis utilizado es el conocido como periódico, en el cual se asume una solución periódica de la distribución de temperaturas en las regiones del piso del destilador y el suelo que se encuentra bajo el mismo; asimismo, se considera periódico el comportamiento de la intensidad solar y la temperatura ambiente. Para calcular la transferencia de calor por convección y por evaporación se utilizan las relaciones de Dunkle.

En la búsqueda de mejorar la eficiencia de los destiladores se han intentado varias opciones, como la de teñir el agua a destilar. Así, Anil K. Rajvanshi en 1981 publica un artículo que es fruto de un estudio analítico y experimental del efecto de diversos tintes en el funcionamiento de un destilador solar. Al realizar la comparación entre los resultados experimentales y aquellos arrojados por su modelo analítico, encontró que la correspondencia entre ellos era excelente. En vista de ello decidió estudiar analíticamente el efecto de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la concentración del tinte, sobre la productividad del destilador. Rajvanshi analiza el proceso de transferencia de energía en el lecho y lo divide en capas discretas de espesor Δx ; en el resto del destilador el análisis es de parámetros concentrados. El coeficiente de transferencia de masa se calcula a través de la analogía entre la transferencia de masa y calor. Dentro de las conclusiones más relevantes de este trabajo se encuentra que, al agregar tintes al agua de destilación aumenta la productividad y que el incremento de la velocidad del viento de 1 a 32 km/h solo incrementa la productividad del destilador en un 10%.

En 1984 Tiwari y Rao publican un trabajo en donde analizan numéricamente el funcionamiento en régimen no permanente de un destilador solar tipo caseta con una pendiente reducida (10 a 15°) con agua que fluye sobre la cubierta del vidrio. Para realizar su análisis, estos investigadores utilizan la teoría periódica para destiladores solares desarrollada por Nayak *et al* (1980). De su análisis numérico concluyen que seis armónicos son suficientes para lograr una buena representación de la insolación y la temperatura

ambiente. Dentro de las conclusiones de este trabajo se apunta que al introducir un flujo uniforme de agua sobre la cubierta se disminuye la temperatura de la misma, lo cual acelera el proceso de condensación, y se mejora la productividad del destilador.

T. Kiatsiriroat *et al* publican en 1986 un artículo en el cual se presenta una modificación a la teoría para la transferencia de masa en destiladores solares con diferentes inclinaciones presentada por Spalding (1963). En el estudio presentado por Kiatsiriroat *et al*, se considera como fuerza impulsora de la transferencia de masa a la fracción masa en la superficie condensante en lugar de la fracción masa del aire húmedo en el interior del destilador, debido a que la primera de ellas puede ser determinada con mayor precisión. Los resultados obtenidos a partir de la teoría modificada y los obtenidos con la relación de Dunkle, se comparan con valores experimentales, y se encuentra que los resultados obtenidos con la modificación de Kiatsiriroat *et al* a la teoría de Spalding concuerdan con los resultados experimentales, lo cual no puede decirse de aquellos resultados obtenidos con la relación de Dunkle. Además, se reporta que dicha relación es precisa sólo en destiladores con pendiente reducida.

A. Tamimi en 1987, estudia el comportamiento de un destilador al cual se le colocan reflectores y se le agrega un tinte negro al agua a destilar. Este investigador encontró que lo anterior mejora considerablemente la productividad. El destilador utilizado en este experimento tenía un área de aproximadamente 1 m², con una inclinación de la cubierta de 45°. El análisis teórico de Tamimi fue de parámetros concentrados en régimen permanente.

El funcionamiento de un destilador solar y la dependencia de la transferencia de calor de la temperatura del agua fue estudiado por Kumar y Tiwari en 1988. El trabajo de estos investigadores se basa en un análisis de parámetros concentrados en régimen no permanente de un destilador solar. Las suposiciones de este análisis son: a) se desprecia la absortividad y el calor específico del vidrio; b) la inclinación del destilador es pequeña; c) no se considera gradiente de temperatura a través del espesor del vidrio ni del tirante de agua; d) el calor específico del material del piso es independiente de la temperatura; e) no existen fugas. Cabe mencionar que las relaciones utilizadas para calcular la convección y la evaporación en el destilador fueron las de Dunkle.

Kumar y Tiwari desarrollaron ecuaciones para determinar el comportamiento del destilador durante los periodos diurno y nocturno. En su experimento se llenaba el destilador con agua a 70°C y se iniciaba a medir a partir de que la temperatura del agua alcanzaba los 65°C; las variables registradas fueron: la temperatura del agua, con termopares tipo T; la temperatura del vidrio y ambiente, con termómetros de mercurio y el destilado, todo a intervalos de una hora.

Dentro de las conclusiones más relevantes de Kumar y Tiwari se pueden anotar las siguientes: 1) el coeficiente de transferencia de calor por evaporación es fuertemente dependiente de la temperatura del agua en el interior del destilador; 2) los coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección tienen poca variación, indicando que pueden ser considerados constantes al realizar los cálculos, lo cual ya había sido mencionado por Cooper; 3) la producción en el periodo nocturno aumenta con el incremento de la masa de agua, y sucede lo contrario durante el proceso diurno. Lo anterior puede atribuirse al aumento de la capacidad de almacenamiento de energía del sistema al elevar la cantidad de masa de agua en su interior.

En 1990, Lawrence S.A. *et al* realizan una validación experimental del análisis térmico de un destilador solar. El estudio teórico es un análisis de parámetros concentrados en régimen permanente. El estudio experimental se realiza en un destilador con geometría de triángulo rectángulo con área en la base de 1 m² y con una pendiente de la cubierta de aproximadamente 10°. Durante la realización de las pruebas se utilizó agua con y sin tinte y se compararon los resultados. Los datos que tomados durante el experimento fueron: la producción diaria; la temperatura ambiente y la radiación solar. Presentan resultados teóricos de la temperatura en el vidrio y sobre el agua; la variación del flux de calor debido a la evaporación; la variación de los coeficientes interiores de transferencia de calor y la producción horaria de destilador por metro cuadrado.

De los resultados teóricos de Lawrence *et al* se desprenden varias conclusiones, de las cuales se destacan: 1) la eficiencia de un destilador solar disminuye con el incremento de la profundidad del tirante con y sin tinte; 2) el efecto del tinte sobre el funcionamiento del destilador solar aumenta con un incremento de la profundidad del agua. Estas conclusiones

parecen contradecir los resultados de Rajvanshi (1981) quien anota en su artículo que "se puede concluir que para una misma concentración de tinte, al incrementar la profundidad del tirante la productividad se eleva".

Clark (1990) estudia el funcionamiento de un destilador solar y sus resultados experimentales lo llevan a sugerir una modificación al modelo original de Dunkle. El experimento reportado en este trabajo se realizó en un destilador de caseta con una sola cubierta con pendiente de 15° . La base de aluminio tenía un área de 0.177 m^2 y una profundidad de aproximadamente 2.5 cm. Para simular la radiación solar sobre el destilador Clark construyó un banco con lámparas incandescentes que le permitieron simular fluxes radiativos entre 315 y 1000 W/m^2 . De las conclusiones de este trabajo se citan las siguientes: a) El modelo original de Dunkle, modificado para utilizar la mitad del valor del coeficiente de transferencia de calor para estimar el coeficiente de transferencia de masa utilizado por Dunkle originalmente, modela con precisión tanto la eficiencia como la temperatura del agua en un destilador solar en régimen permanente; b) Las causas por la que Cooper subestima los valores de la eficiencia en un destilador solar calculadas con el modelo original de Dunkle, son que el aparato experimental de Cooper puede haber suprimido las pérdidas internas por radiación infrarroja y que puede haber promovido la ebullición en el lecho debido al tipo de resistencia (tipo serpentín) utilizada para calentar el agua en el interior del destilador.

Yadav presenta en 1990 un estudio teórico y experimental del funcionamiento de un destilador solar con geometría de triángulo rectángulo, el cual es alimentado con un flujo constante de agua caliente. El trabajo experimental se realiza en un destilador pequeño (1 m^2 en la base) con una pequeña inclinación. El cálculo de los diferentes coeficientes de transferencia de calor se obtienen de las relaciones de Dunkle y Malik *et al* (1982).

También en 1990, R.S, Adhikari *et al* publican un trabajo en que se realizan estimaciones de tasas de transferencia de masa en destiladores solares. Adhikari *et al* realizan experimentos en un destilador solar en régimen permanente bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos son comparados con otras relaciones para determinar tasas de transferencias de masa en destiladores solares, tales como la de Dunkle. Adhikari *et*

al encuentran que la relación de Dunkle solo es válida cuando el número de Grashof es menor de 2.51×10^5 y necesita modificaciones para números de Grashof mayores. Cabe mencionar que el dispositivo utilizado para realizar las pruebas experimentales en este trabajo no tiene la geometría de un destilador solar de tipo caseta, lo cual podría hacer pensar que no se presentan los mismos patrones de flujo de calor y masa que se presentan en este tipo de destiladores.

En 1991 Yadav y Prasad realizan un estudio paramétrico sobre un destilador solar con geometría de triángulo rectángulo con cubiertas de pendiente reducida. El análisis es teórico y está basado en un análisis en régimen no permanente del funcionamiento del destilador. En este trabajo se estudian los efectos que se registran sobre la producción y la eficiencia del destilador al utilizar diferentes masas de agua; variar la temperatura inicial y cambiar la absorptividad del piso. Algunas de las conclusiones de este trabajo son: a) la eficiencia del destilador disminuye al incrementarse la masa de agua en el interior del destilador; b) la eficiencia se incrementa al aumentar la temperatura inicial. Ambas conclusiones fueron reportadas en anteriores investigaciones.

G.M. Tiwari y S.A. Lawrence (1991), en una nota técnica, presentan una modificación a la ecuación desarrollada por Hollands (Bejan, 1984) para convección natural de aire en cavidades rectangulares inclinadas en el rango de 0 a 75° . La modificación propuesta consiste en: a) calcular el número de Rayleigh utilizando las propiedades del vapor de agua y b) calcular la diferencia de temperatura, con la expresión utilizada por Dunkle (1961). No se presenta ningún tipo de resultado experimental. Además, la ecuación que presentan es válida para cavidades en la cuales la razón entre la base y la altura sea mayor de 10 (Bejan, 1984), lo que significa que sólo puede utilizarse con confianza en destiladores con pendiente pequeña.

Tayeb (1992) realiza un estudio experimental del funcionamiento de destiladores solares con las siguientes geometrías: a) triángulo rectángulo con baja pendiente de las cubiertas; b) cilindro truncado; c) dos cilindros truncados concéntricos y d) esférica. La cubierta del destilador (a) era de vidrio, mientras que la de los restantes era de plexiglas. Este investigador midió la temperatura del agua, de la cubierta y del ambiente; registró la

insolación horaria para los días de prueba, así como la producción de destilado y encontró que la eficiencia de los diferentes destiladores evaluados por él se ubicaba en un rango de 14.9 a 21.8%. Algunas de las conclusiones relevantes de este trabajo son: 1) Al incrementar el área de condensación se eleva la productividad; 2) la utilización de vidrio como material para la cubierta resulta más efectivo que la utilización de plexiglas durante las horas de sol, pero con el plexiglas se obtienen mejores resultados después del ocaso.

G.N. Tiwari *et al* (1994) publican una nota técnica en la cual analizan teóricamente el efecto de la inclinación de la cubierta sobre la producción de destilado. El análisis realizado es de parámetros concentrados y la ecuación para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección es la modificada por Tiwari y Lawrence (1991) a partir de la ecuación de Hollands (Bejan, 1984). De acuerdo a los resultados obtenidos se llega a las siguientes conclusiones: a) la producción de destilado se incrementa durante el invierno al aumentar la inclinación, sucediendo lo contrario durante el estío; b) hay una reducción significativa en el coeficiente de transferencia de calor por evaporación con el incremento de la inclinación tanto en invierno como en verano.

En particular en Baja California Sur, se han hecho importantes estudios de destilación solar de agua de mar. Desde los destiladores solares "de caseta", como los que abastecieron de agua a Puerto Chale durante varios años, hasta los diferentes sistemas destiladores que se probaron en Las Barrancas, estos desarrollos responden a la aguda carencia de agua potable en la región (Fernández, 1988).

Se han realizado varios proyectos de destilación solar de agua marina en Baja California Sur. Las más recientes instalaciones se han hecho en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) (Porta y Fernández, 1994; McCracken y Porta, 1990) y en el Instituto Tecnológico de La Paz (Fernández y Chargoy, 1990). Estas investigaciones han proporcionado información valiosa en lo que respecta a resultados en condiciones reales de funcionamiento y a la factibilidad de realizar proyectos de tal naturaleza en áreas climáticamente similares a la ciudad de La Paz. En particular, Porta y Fernández (1993) analizan el comportamiento de destiladores solares ligeros y apuntan que un aspecto que generalmente abordado apenas superficialmente es la importancia del efecto

de inercia térmica de los materiales componentes. Estos investigadores, estudian la variación del destilado en función de la irradiancia para lo cual definen el factor de esbeltez de la inercia térmica, S_r , y señalan que cuando $S_r < 0.2$, la producción es una función prácticamente lineal de la irradiancia y marcadamente independiente de los otros factores climáticos; por otro lado, cuando $S_r > 0.9$, una gran porción de la producción diaria del destilado se presenta después de que el sol se ha puesto.

Como se ha visto en la presentación de estos antecedentes, aunque varios científicos que trabajan dentro del área de la energía solar han investigado los efectos del clima y de los parámetros de diseño y operación sobre el funcionamiento de destiladores de tipo caseta (Baibutaev y col, 1970; Cooper, 1969a; Cooper, 1969b; Cooper, 1972; Garg y Mann, 1976; Lawrence y col, 1990; Rajvanshi, 1981; Yadav y Prasad, 1991), en la literatura sobre el tema persiste cierto vacío respecto a los mecanismos mediante los cuales ocurre el transporte de agua hacia la cubierta condensadora y su relación con la eficiencia de los destiladores, siendo la mayor parte de los resultados de tipo empírico.

Palacio y Fernández (1993) han presentado resultados numéricos que indican que en destiladores solares tipo caseta los efectos convectivos son especialmente significativos para ángulos de la cubierta que proporcionan mayor espacio entre ésta y el lecho. Los resultados experimentales disponibles, sin embargo, no aportan indicio alguno sobre los patrones de movimiento o los campos de temperatura en el interior de destiladores con el tipo de geometría propuesto en este trabajo. Asimismo, la modelación del fenómeno se limita a balances de masa y energía entre el lecho y la cubierta y no se considera un comportamiento particular del fluido acorde con la temperatura de operación y condensación y la geometría del destilador. Del mismo modo, la mayoría de la investigación experimental en destiladores solares se ha realizado en dispositivos de baja inclinación de las cubiertas y una reducida sección transversal.

Así pues, este trabajo pretende aportar conocimientos acerca de los mecanismos de transporte de vapor en destiladores solares tipo caseta con una alta inclinación y de gran sección transversal.

Objetivos

Objetivo general

Realizar la caracterización experimental de un destilador solar tipo caseta de gran sección transversal.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

1. Analizar los modelos matemáticos de parámetros concentrados encontrados en la bibliografía.
2. Realizar mediciones de temperatura en diferentes puntos del destilador.
3. Realizar un análisis de la transferencia de calor mediante números adimensionales.
4. Realizar mediciones de la producción de destilado y de la eficiencia del destilador.
5. Realizar mediciones de las variables ambientales que influyen en el funcionamiento del destilador.
6. Comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los resultados experimentales reportados en investigaciones anteriores sobre destiladores de baja inclinación de las cubiertas y una reducida sección transversal.

continua de agua salada. Se asume entonces que el calor sensible requerido para elevar la temperatura del agua alimentada hasta la temperatura del agua en el lecho es despreciable comparada con el calor latente de evaporación ($cp_u (T_u - T_a) \ll \lambda$).

2. No hay fugas de vapor al ambiente.
3. No hay gradientes de temperatura horizontales en la cubierta de vidrio ni en el piso.

Balance de energía en la cubierta del destilador

El balance de energía térmica en la cubierta puede expresarse como la acumulación de energía por unidad de tiempo en la cubierta, la cual está determinada por la diferencia entre el flux de energía que entra y sale de la misma. Así:

$$\frac{mcp}{A} \int_v \frac{dT}{dt} = (\tau'G)_v + (q_{ctv} + q_{rtv} + q_{etv}) - (q_{cva} + q_{rva}) \quad (1)$$

El término que se encuentra a la izquierda del signo igual representa la acumulación de energía en la cubierta. La primera expresión a la derecha del signo igual representa a la radiación solar incidente, la cual se calcula utilizando el modelo y los mapas solarimétricos realizados por Almanza *et al* (Fernández, 1987). La fracción de energía absorbida por el vidrio se calcula como sigue:

$$\tau'_v = e^{-\frac{(kd)_v}{\cos\varphi}} \quad (2)$$

El ángulo de refracción (φ) se calcula mediante la ley de Snell:

$$\varphi = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_i}{n_v} \text{Sen}\theta \right) \quad (2a)$$

Donde θ es el ángulo que forman en el instante t la dirección de la radiación solar directa y la normal al plano de la cubierta de vidrio; n_v y n_i son los valores correspondientes al índice de refracción del aire (1) y del vidrio (1.5) (Fernández, 1987), respectivamente.

El flux de energía de la superficie del tirante al vidrio se calcula:

$$q_{ctv} = h_{ctv} (T_t - T_v) \quad (3)$$

Donde el coeficiente convectivo se calcula de acuerdo a la ecuación propuesta por Poulidakos y Bejan (1983):

$$h_{ctv} = \frac{k_v}{l_{tv}} [0.345Ra^{0.3}] \quad (4)$$

Es necesario hacer algunas observaciones a la ec 4: 1) esta ecuación se obtuvo para una cavidad triangular llena de aire; en el caso de interés la cavidad se encuentra llena de aire y vapor de agua; 2) la relación entre la altura y la base de la cavidad utilizada por Poulidakos y Bejan (1983) fue de 0.207, mientras que el valor de dicha relación en el dispositivo utilizado en este trabajo es de 0.25; 3) el rango de Ra en el experimento de los investigadores citados es de 10^6 a 10^7 .

Además, en la ec 4 el número de Rayleigh se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{g\beta l_{tv}^3}{\nu\alpha} \Delta T' \quad (5)$$

Donde l_{tv} es la distancia promedio entre los extremos superior e inferior entre de la cubierta de vidrio y la superficie de agua; las propiedades físicas consideradas son las correspondientes al aire en el interior de la cavidad; finalmente, la diferencia de temperaturas $\Delta T'$ considerada es la sugerida por Dunkle para evaporación no isotérmica y se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta T' = (T'_t + T'_v) + \frac{(p_t - p_v)T'_t}{267.72 \times 10^3 - p_t} \quad (6)$$

Para calcular la presión parcial del agua dentro del rango de 10° a 150°C , se emplea la expresión empírica desarrollada por Brooker que Adhikari et al (1990) utilizan:

$$p = 6893.03 \exp\left(54.63 - \frac{12301.69}{X} - 5.17 \ln X\right) \quad (7)$$

Donde $X = 1.8 T + 491.69$.

La transferencia de calor por radiación se calcula con la siguiente expresión:

$$q_{rtvo} = \frac{\epsilon_v \sigma}{1 - \epsilon_v} \left[0.0466 T_{vo}^4 - (0.024 T_{vp}^4 + 0.0244 T_t^4) \right] \quad (8)$$

La ecuación 8 se obtuvo al resolver el sistema de ecuaciones que resulta de modelar al destilador como una cavidad integrada por tres superficies, en donde se supone que las superficies son grises difusas, se considera que el destilador tiene un factor de forma de 0.5 (Incropera y DeWitt, 1990), y que la emisividad total hemisférica del vidrio y del agua toma valores a 300 K de 0.95 y 0.96, respectivamente (Necati, 1985). Cabe mencionar que la ec 8 calcula el flux de calor que recibe por radiación la cara que da al oriente y que se utilizará una ecuación similar a la número 8 para calcular el flux correspondiente a la cara que da al poniente.

La transferencia de calor por evaporación en el interior del destilador involucra procesos de transferencia de masa y calor y se calcula considerando el flux másico por la entalpía de evaporación:

$$q_{\text{etv}} = (m''\lambda)_u \quad (9)$$

Donde el flux másico se relaciona con el coeficiente de transferencia de masa de la siguiente manera:

$$m'' = h_m(\rho_t - \rho_v) \quad (10)$$

Ahora, mediante la analogía que existe entre la transferencia de masa y de calor y considerando que el número de Lewis es básicamente 1 para sistemas formados por aire y vapor de agua (Treyball, 1980), se tiene:

$$h_m = \frac{h_{\text{ctv}}}{(\rho c p)_i \text{Le}^{1-n}} = \frac{h_{\text{ctv}}}{(\rho c p)_i} \quad (11)$$

Sustituyendo las ecs 11 y 10 en la ec 9; considerando que la mezcla de aire y vapor de agua se comporta como gas ideal y evaluando las propiedades térmicas a la temperatura media entre la superficie del agua y el vidrio, se obtiene:

$$q_{\text{etv}} = \frac{h_{\text{ctv}}(\lambda M)_u}{(\rho c p)_i RT'_m} (\rho_t - \rho_v) \quad (12)$$

El valor del flux másico se obtiene despejando de la ec 9. Para calcular la entalpía de vaporización del agua se utilizó la siguiente expresión empírica (Sharma y Mullick, 1991):

$$\lambda_u = 3044205.5 - 1679.1109T'_i - 1.14258T'_i{}^2 \quad (12a)$$

Para calcular el flux de energía entre el vidrio y el ambiente se utilizó la siguiente ecuación:

$$q_{cva} = h_{cva} (T_v - T_a) \quad (13)$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor está dado por la ecuación de Watmuff et al (Shawaqfeh y Farid, 1995):

$$h_{cva} = 2.8 + 3.0V \quad (14)$$

La velocidad del viento (V) está dada en $m s^{-1}$.

El flux de calor por radiación hacia el ambiente se calculó considerando el caso de la transferencia radiativa entre una superficie pequeña rodeada por una gran cavidad ($A_v \ll A_a$), así pues:

$$q_{rva} = h_{rva} (T'_v - T'_f) \quad (15)$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor radiativo se define como:

$$h_{rva} = \sigma \epsilon_v (T'_v{}^2 + T'_f{}^2) (T'_v + T'_f) \quad (16)$$

En la ec 16, se calcula de la siguiente manera (Kudish, 1987):

$$T'_f = T'_a - 10 \quad (17)$$

Sin embargo, dado que la sustitución de la ec 16 en la ec 15 da como resultado una diferencia de temperaturas elevadas a la cuarta potencia la forma de determinar T'_f no es crítica (Kudish, 1987).

Balance de energía en la superficie del tirante

El balance de energía térmica en la superficie del lecho de agua está dado por:

$$\frac{mcp}{A} \int_t \frac{dT_t}{dt} = \tau'_t G_v + q_{tp} - (q_{ctv} + q_{rtv} + q_{etv}) \quad (18)$$

Donde la fracción de energía absorbida por el tirante (τ'_t) se calcula considerando la absorptancia media hemisférica del agua (α_w), la transmitancia total del vidrio y las reflexiones múltiples que ocurren entre la superficie del tirante y la cubierta del vidrio; este último elemento se estima a través de la reflectancia a la radiación difusa (ρ_d) (Fernández, 1987):

$$\tau'_t = \frac{\tau_v \alpha_u}{1 - (1 - \alpha_u) \rho_d} \quad (19)$$

Donde la transmitancia total se calcula como sigue:

$$\tau_v = \tau'_v \tau_v^* \quad (19a)$$

La ecuación 19a presenta dos componentes a la derecha del signo igual, el primero de ellos se define en la ecuación 2, mientras que el segundo representa a la transmitancia limitada por la reflexión y está dada por:

$$\tau_v^* = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (19b)$$

Donde ρ es la reflectancia instantánea y se calcula mediante la expresión de Fresnel:

$$\rho = \left[\frac{\text{sen}^2(\varphi - \theta)}{\text{sen}^2(\varphi + \theta)} + \frac{\tan^2(\varphi - \theta)}{\tan^2(\varphi + \theta)} \right] \quad (19c)$$

La reflectancia a la radiación difusa suele evaluarse como constante en el tiempo, y es muy similar al resultado de sustituir $\theta = 60^\circ$ en las ecuaciones 2a y 19c (Fernández, 1987).

El flux de energía entre el piso y el tirante se calculó de la siguiente forma:

$$q_{tp} = h_{tp} (T_p - T_t) \quad (20)$$

Donde el coeficiente convectivo de transferencia de calor se obtuvo a partir de la ecuación de McAdams (Kudish, 1987; Necati, 1985) para convección natural en régimen laminar sobre una superficie horizontal a temperatura uniforme:

$$Nu_{tp} = \frac{h_{tp} l_t}{k_u} \quad (21)$$

Donde:

$$Nu_{tp} = 0.59 (Gr Pr)^{1/4} \quad (22)$$

El número de Prandtl está dado por:

$$Pr = \left(\frac{\alpha}{\nu} \right)_u \quad (22a)$$

Por otro lado, el número de Grashof se define como:

$$Gr = \frac{l_t g \beta' (T_p - T_t)}{\nu_u^2} \quad (22b)$$

El valor del número de Prandtl, el coeficiente de expansión y la viscosidad cinemática del agua se obtienen a partir de ecuaciones de ajuste exponenciales y logaritmicas que se obtuvieron a partir de datos experimentales reportados para un intervalo de temperaturas de 300 a 345 K (**Incropera y DeWitt, 1990**).

Balance de energía en el piso del destilador

El balance de energía térmica en el lecho de agua incluye términos que toman en cuenta la conducción de calor hacia el suelo y el efecto de la inercia térmica del piso. Así, el balance está dado por:

$$\left. \frac{mcp}{A} \right]_p \frac{dT_p}{dt} = \tau'_p G_v - (q_{tp} + q_{ps}) \quad (23)$$

Donde la fracción de la energía absorbida por el piso se calcula de la siguiente manera:

$$\tau'_p = \tau''_u \alpha_p \quad (24)$$

El flux de calor por conducción hacia el suelo se calcula como sigue:

$$q_{ps} = \left(\frac{k}{l} \right)_p (T_p - T_s) \quad (25)$$

Donde la temperatura del suelo se considera con un valor constante de 38°C; este último dato toma este valor a partir de los resultados experimentales que se reportan en este mismo trabajo.

Metodología

Descripción del destilador solar

El destilador solar está orientado hacia el norte, como se muestra en la fig 2, y tiene las siguientes dimensiones: 5 m de ancho, 10 m de largo y 2.5 m de altura. La estructura de soporte del destilador está construida de madera de pino tratada y barnizada. Las cubiertas del destilador son de vidrio de 6 mm de espesor. La base de concreto armado del destilador tiene un espesor de 15 cm y está cubierta con pintura comercial color negro mate. Este destilador cuenta con 4 canales recolectores de fibra de vidrio, colocados en las parte media e inferior de las caras este y oeste; además se recolecta el destilado que se produce en las caras norte y sur utilizando canales de PVC. El destilador cuenta también con dos canales de desagüe para eliminar la salmuera.

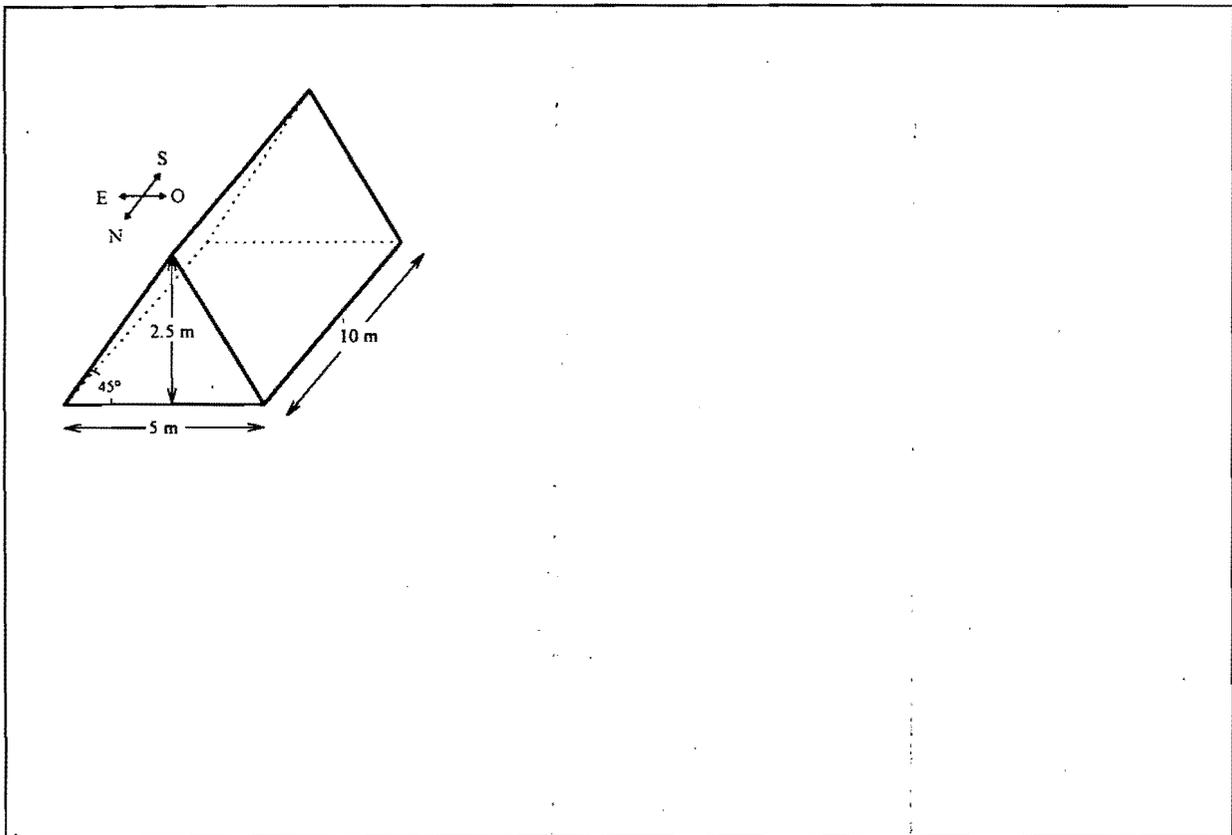


Figura 2. Dibujo esquemático y fotografía del destilador.

Instrumentación

La instrumentación utilizada en el desarrollo de las pruebas experimentales fue la siguiente:

- Termopares tipo J calibre 30.
- Sistema de adquisición de datos marca OMEGA, modelo OM-900; para registrar la temperatura se utilizaron 2 módulos marca OMEGA, modelo OM-931, cada uno de los cuales tiene capacidad para 8 canales de conexión de termopares; de acuerdo con el fabricante la precisión del sistema es de $\pm 0.24^{\circ}\text{C}$.
- Piránometro blanco y negro marca Eppley modelo 8-48.
- Multímetro digital Hewlett Packard modelo 3465A.
- Termoanemómetro marca Alnor modelo 8565.
- Probetas graduadas de 1 l con una precisión de ± 0.05 l.

Para pegar los termopares a las superficies se utilizó una pasta epóxica de color blanco con una conductividad térmica de $1.046 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$, la cual es muy semejante a la del vidrio, $0.78 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ (Necati, 1985). Cabe mencionar que al instalar los termopares en los vidrios se evitó que se cubrieran uno al otro.

Descripción de las pruebas experimentales

Del 20 de octubre al 9 de noviembre de 1995 se realizaron 8 pruebas experimentales. El registro de temperaturas se realizó utilizando el sistema de adquisición de datos conectado a una computadora que almacenaba, a través de un programa en Q-Basic, cada 5 minutos las señales enviadas por los termopares.

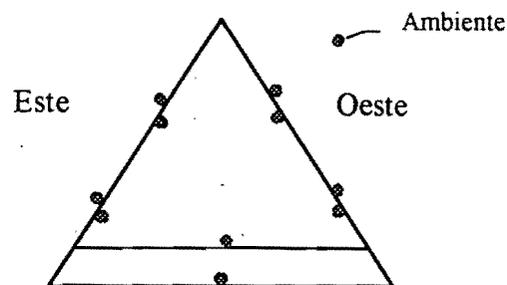


Figura 3. Puntos de medición de temperatura para las pruebas con tirante de 2, 4 y 6 cm.

Con objeto de observar la variación de la productividad, eficiencia y el efecto de la inercia térmica en el funcionamiento del destilador al variar la altura del tirante, las primeras tres pruebas se realizaron con tirantes de 2, 4 y 6 cm; cada una de ellas tuvo una duración de 24 horas. Se registró la temperatura en los puntos que se muestran en la fig 3. Las temperaturas se tomaron en estos puntos con el fin de observar si existe alguna relación entre la variación de la diferencia de temperaturas entre la superficie de evaporación y condensación y la producción de destilado. Durante cada una de las pruebas se registró cada 10 minutos la velocidad del viento con un termoanemómetro que se instaló al aire libre a 5 m de distancia del destilador. Para llevar a cabo estas pruebas se utilizó agua de la red de agua potable. El destilador se cargó con 24 horas de anticipación con la cantidad de agua correspondiente al tirante a utilizar durante la prueba. Las pruebas se iniciaban a las 7:00 horas; cabe mencionar que antes de empezar la prueba se ajustaba al tirante. En la fig 4 se representa mediante un digrama del procedimiento utilizado, el cual fue idéntico para todas las pruebas.

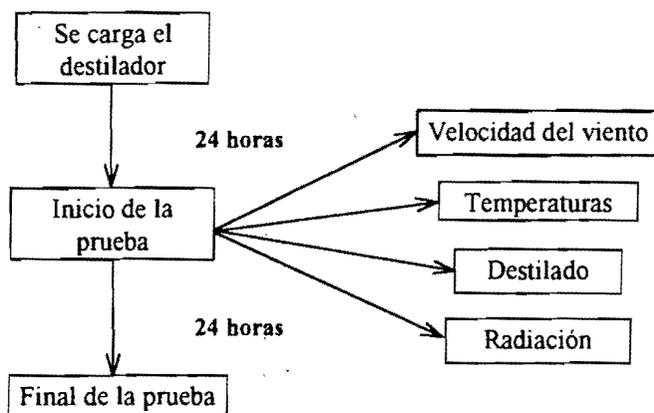


Figura 4. Diagrama esquemático del procedimiento utilizado para realizar las pruebas experimentales.

Se calculó la productividad del destilador para cada uno de los tirantes con la siguiente ecuación (Kudish, 1987):

$$\Phi = 3.6 \times 10^3 \sum \frac{m_u}{A_p} \Delta\theta \quad (\text{de } \theta_1 \text{ a } \theta_2)$$

Durante las 24 horas del día, utilizando probetas graduadas, se registró cada 30 minutos la producción de destilado en las secciones inferior y superior de las caras este y oeste, así como la producción de destilado de las caras norte y sur.

Se calculó la eficiencia del destilador para cada una de las pruebas con la siguiente ecuación (**Kudish, 1987**):

$$\eta = \frac{\lambda \Phi}{3.6 \times 10^3 \sum G_h \Delta \theta} \quad (\text{de } \theta_1 \text{ a } \theta_2)$$

Con un piranómetro y un multímetro digital, se tomó cada 10 minutos la lectura de la radiación solar incidente e integrando numéricamente los datos registrados de ésta durante el día en que se realizó la prueba, se obtuvo el valor de la energía utilizada por el destilador para su funcionamiento.

La definición del número de Nusselt corresponde a la utilizada por Poulidakos y Bejan (**1983**) en su estudio experimental para cavidades triangulares llenas de aire:

$$Nu = \frac{Q_u l}{k_{vu} W L \Delta T'}$$

En donde Q_u se calculó utilizando el destilado de agua recolectado multiplicado por el calor de vaporización del agua (ec 12a) y por el intervalo de tiempo (30 min). La diferencia de temperatura corresponde a la registrada entre la superficie del agua y aquella correspondiente a la cubierta interior del vidrio y se calcula con la ec 6.

El número de Rayleigh se calculó con la siguiente ecuación (**Poulidakos y Bejan, 1983**):

$$Ra = \frac{\beta g l^3 \Delta T'}{(\alpha \nu)_{vu}}$$

Las propiedades físicas que aparecen en la definiciones de número de Nusselt y Rayleigh fueron evaluadas a la temperatura media aritmética entre la superficie del agua y la superficie interior del vidrio.

Inmediatamente después de cada prueba se realizó mantenimiento preventivo al destilador, el cual consistió básicamente en una inspección y sellado de fugas, y de inspección, limpieza y reparación de la cubierta del lecho, en caso de que se hubiera requerido.

Con el propósito de estudiar el comportamiento de la capa límite térmica en el interior del destilador se colocaron termopares cuya ubicación se muestra en la fig 5. Esta disposición se utilizó en la prueba cuatro (cara superior este) y seis (cara inferior oeste). Se ubicaron los termopares de tal forma que fuera posible cubrir la distancia equivalente al espesor de capa límite máximo (12 mm) reportado por Baum y Bairamov (1964); por otro lado se midió por secciones debido al número de canales disponibles para realizar las mediciones. Es importante decir que en el interior del destilador existen gran variedad de obstáculos, tales como canales de recolección de destilado y vigas de madera que soportan la estructura del destilador; lo anterior supone que el flujo de vapor sobre los vidrios se ve alterado por estos obstáculos. Así pues, con el fin de comparar los resultados de este trabajo con los obtenidos por Baum y Bairamov (1964), se procuró medir las temperaturas en la parte media de los vidrios.

Los termopares del 1 al 6 se colocaron separados entre si por una distancia de 2 mm a partir de la superficie del vidrio; los termopares del 7 al 12 se ubicaron con la misma separación que los anteriores a partir de la superficie del tirante. Si se imagina una línea vertical que cruce los termopares desde la parte interna de la cubierta de vidrio hasta el piso, ésta tendría una longitud de 1.87 m. Con el fin de calcular las pérdidas térmicas hacia el suelo, se colocó un termopar en la parte inferior del destilador teniéndose el cuidado de que hiciera contacto térmico con el piso de concreto. En las pruebas cuatro y seis se midió la temperatura cada 5 minutos durante un periodo de 24 horas. En todas estas pruebas, el registro del destilado, la velocidad del viento y la radiación se realizó de la misma forma que en las pruebas anteriores.

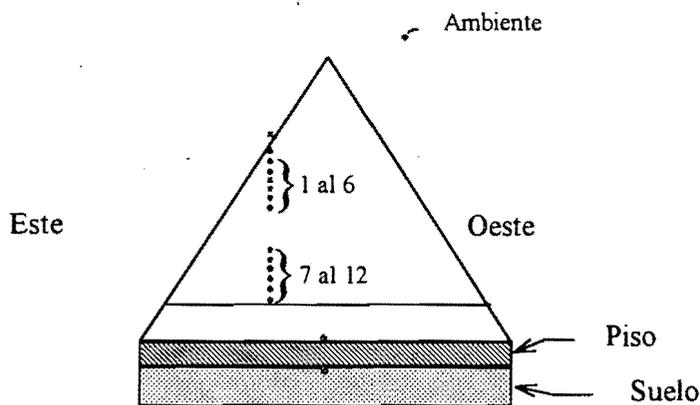


Figura 5. Ubicación de los termopares en las pruebas 4 y 6.

En la fig 6 se muestra la ubicación de los termopares para la prueba cinco (cara inferior este) y siete (cara inferior oeste). Los termopares del 1 al 6 se colocaron con una separación de 2 mm entre sí a partir de la superficie interior de la cubierta del destilador; los termopares del 7 al 12 se ubicaron con la misma separación que los termopares mencionados anteriormente, encontrándose el termopar 12 a 2 mm del tirante. Si ahora se imagina una línea vertical que cruce los termopares desde la parte interna de la cubierta de vidrio hasta el piso, ésta tendría una longitud de 0.62 m. En la prueba número cinco se midió la temperatura cada 5 minutos durante un periodo de 24 horas.

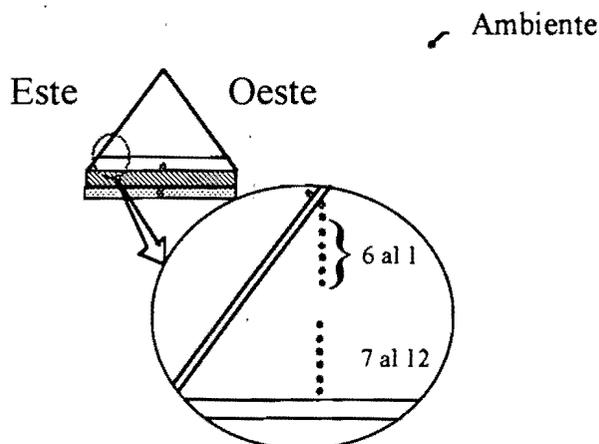


Figura 6. Ubicación de los termopares en las pruebas 5 y 7.

Con el propósito de observar la variación de la temperatura en la parte central del destilador se colocaron termopares cuya disposición se muestra en la fig 7 y que corresponde a la prueba ocho (sección central).

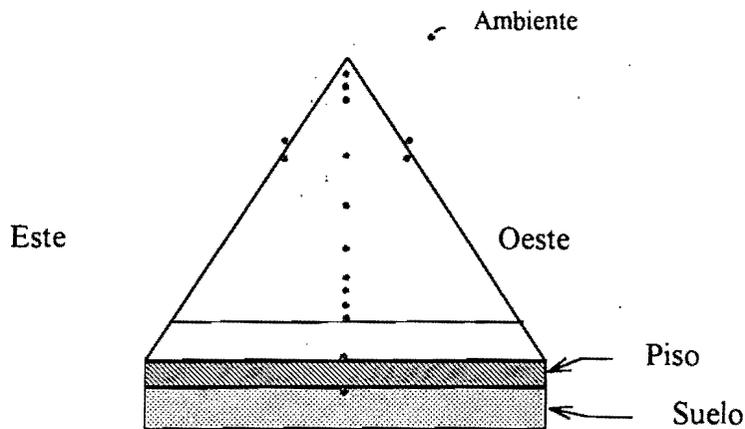


Figura 7. Ubicación de los termopares en la prueba número 8.

Los tres termopares situados en la parte superior del destilador se colocaron con una separación de 2, 6 y 12 mm entre sí a partir del ápice. Los siguientes tres termopares se

emplazaron a una altura piso de 1.725, 1.15 y 0.575 m, respectivamente. Los últimos cuatro termopares se colocaron a una altura del piso de 4.12×10^{-2} , 0.406×10^{-2} , 0.402×10^{-2} y 4×10^{-2} m, respectivamente. Si se imagina una línea que cruce los termopares desde el ápice del destilador hasta el piso, ésta tendría una longitud de 2.3 m. En la prueba número ocho se midió la temperatura cada 5 minutos durante un periodo de 24 horas. Los termopares se ataron con hilo de seda.

Resultados

Con objeto de resumir los resultados, a la prueba con tirante de 2 cm se la denominará prueba 1; a la prueba con tirante de 4 cm, prueba 2 y a la de 6 cm, prueba 3. Por otro lado, en todas las pruebas que se llevaron a cabo para observar el comportamiento de la capa límite, el tirante utilizado fue de 4 cm; así pues, para estas pruebas adoptaremos la convención de llamar prueba 4 a aquella en la cual se colocaron los termopares de acuerdo a la fig 5 en la cara este y prueba 6 a la prueba que utiliza el mismo arreglo pero en la cara oeste. De la misma forma, llamaremos prueba 5 y 7 a las pruebas en las se utiliza el arreglo de termopares mostrado en la fig 6, en la cara este y oeste, respectivamente. Finalmente, la prueba 8 será la que corresponde a la mostrada en la fig 7.

Prueba 1: tirante de 2 cm.

La producción total de destilado fue de 104.8 l. En la fig 8 se muestra la producción de destilado acumulada cada 30 min, y se observa que el valor más elevado del flujo de destilado fue de aproximadamente 0.16 l/min, y se presentó a las 15:00 horas del día; después de ese momento la producción de destilado comenzó a disminuir.

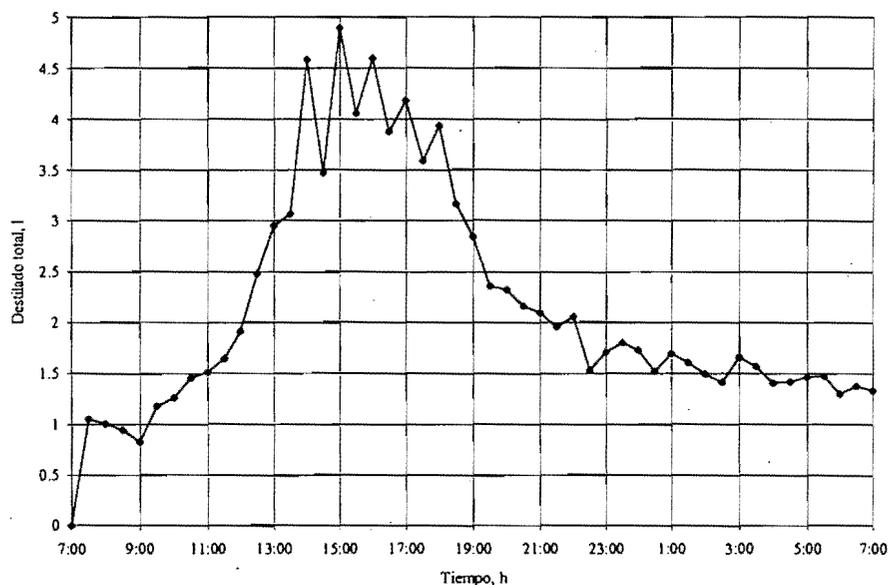


Figura 8. Producción total de destilado durante la prueba 1.

Como se puede apreciar en la fig 8, en la producción de destilado se registró un incremento brusco a la 13:30 horas, pues aumentó de 0.1 l/min, aproximadamente hasta casi

0.15 l/min a las 14:00 horas, dos horas después de que se presentara el valor máximo de radiación incidente (fig 9). Por otro lado, durante el periodo nocturno, el cual se inicia a las 18:00 horas, se continuó registrando producción de destilado, tanto así que durante este periodo se obtuvo el 44.2% de la producción total de destilado.

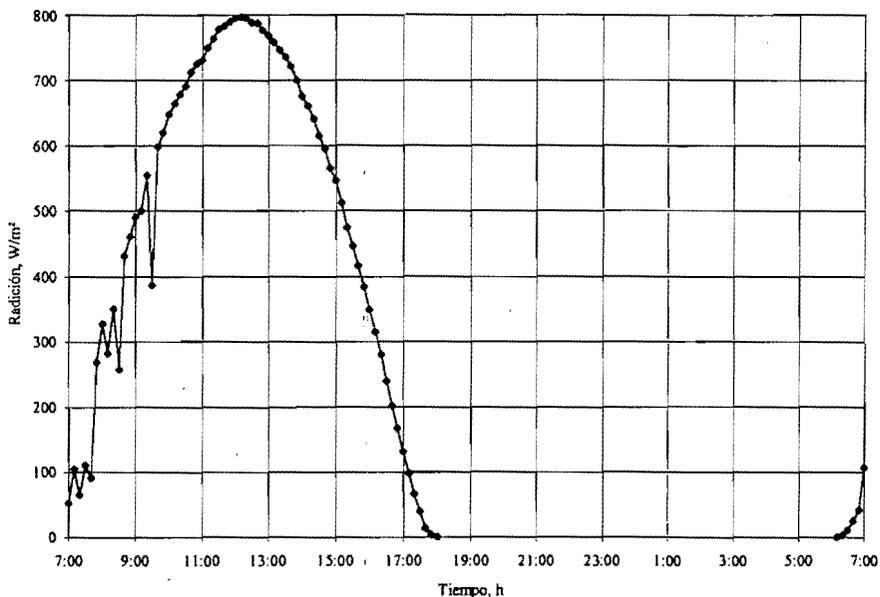


Figura 9. Radiación solar incidente durante la prueba 1.

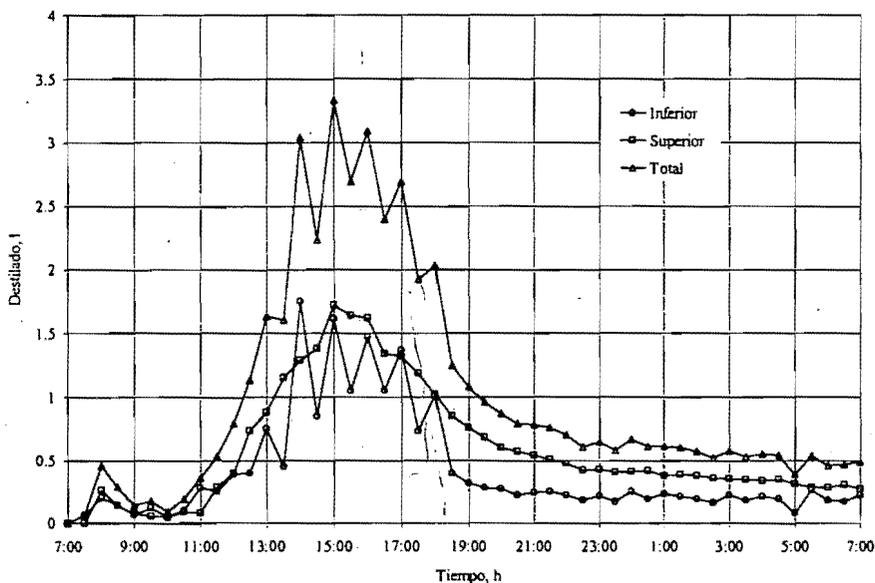


Figura 10. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 1.

Tal como se aprecia en la fig 10, durante el periodo diurno la producción en los canales superior e inferior de la cara este fue muy semejante; sin embargo, durante el

periodo nocturno la producción en la sección superior fue de un 47% más elevada que lo producido por la sección inferior; como se verá más adelante, esto no sucede en las otras pruebas, lo que hace pensar que esta diferencia se deba a una fuga no detectada antes en el canal inferior. La producción máxima en la cara este fue de 0.12 l/min, aproximadamente, y se presentó a las 15:00 horas del día, después de ese instante la producción de destilado disminuyó. En la cara este se obtuvo el 46% de la producción total, distribuida de la siguiente forma: el 19% se generó en la sección inferior, mientras que en la sección superior se generó el 27%. Del destilado total obtenido en la cara este el 37% se produjo durante el periodo nocturno.

En contraste con lo que se presentó en la cara este, en la fig 11 se aprecia que la producción diurna y nocturna de los canales superior e inferior fue muy parecida, así que el 50% de la producción se obtuvo durante el día y el resto durante la noche. En la cara oeste se obtuvo el 48% de la producción total de destilado y se registró la máxima producción después del ocaso. En esta cara el comportamiento de la producción de destilado es muy estable, de tal suerte que la cantidad de destilado registrada en cada intervalo de medición varía entre 1 y 1.5 l. La producción de destilado en los canales inferior y superior fue muy semejante, así que el aporte de destilado de la sección superior e inferior a la producción total fue del 23% y 25.5%, respectivamente.

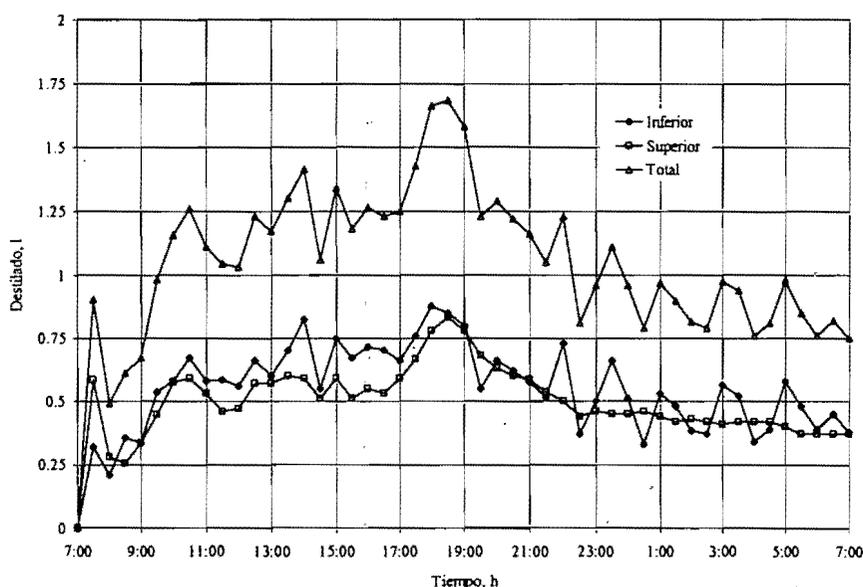


Figura 11. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 1.

En la fig 12 se observa que en la cara este, durante las primeras 6 horas de la prueba, las temperaturas en la sección superior e inferior de los vidrios en el interior del destilador presentan diferencias hasta de 2.4°C , mientras que en los ubicados en el exterior las diferencias fueron prácticamente del doble. Durante el periodo nocturno, la diferencia promedio entre la sección superior e inferior en el exterior del destilador fue de 1°C , mientras que en el interior fue de 0.15°C .

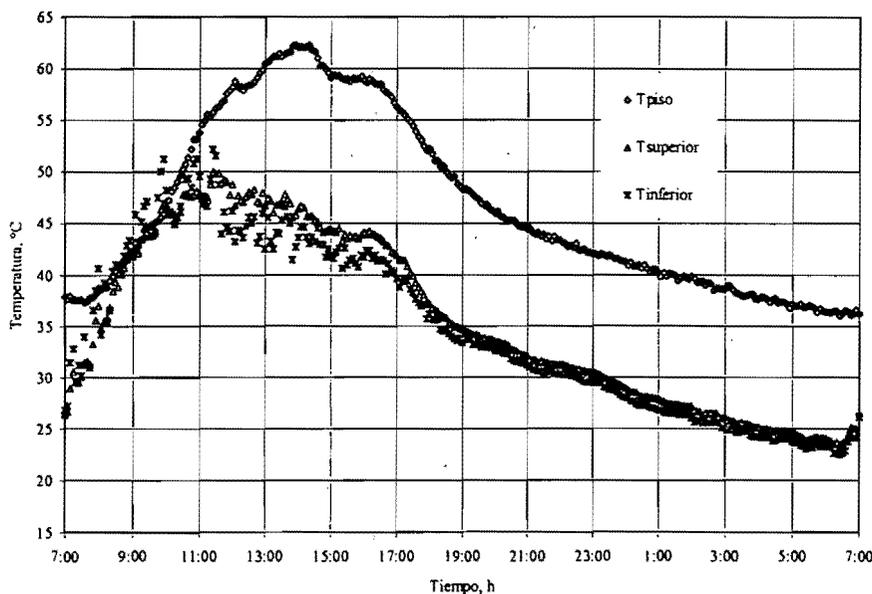


Figura 12. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles de la cara este durante la prueba 1.

Al revisar las figs 10 y 12 se puede notar que las producciones más altas de destilado en la cara este se presentan en el periodo en que la diferencia de temperatura entre la superficie del piso y la cubierta es más pronunciada. Por otro lado, durante las primeras horas de la mañana, la diferencia de temperatura entre la cubierta este y el agua son más reducidas que aquellas que se presentan entre ésta y la cara oeste, lo que parece explicar el hecho de que durante el periodo que va de las 8:00 a las 11:00 horas, la producción de destilado en la cara este disminuye, mientras que en la cara oeste aumenta. También es de hacer notar, que la diferencia promedio de temperatura entre el piso y la cubierta inferior este y oeste fue de 5.5 y 5°C , respectivamente, y que la diferencia promedio de temperaturas entre el agua y las cubiertas durante el periodo nocturno disminuye y es prácticamente igual en ambas.

Como se aprecia en la fig 13, en la cara oeste el comportamiento de las temperaturas exteriores en la sección superior e inferior es muy semejante, de forma tal que la diferencia máxima entre ellas es de 1.45°C . La temperatura máxima sobre los vidrios de la cara oeste en el exterior del destilador fue de 51°C y se presentó a las 14:00 horas. La diferencia máxima entre la temperatura de la sección superior e inferior en el interior del destilador en la cara oeste fue de 2.56°C y se presentó también a las 14:00 horas. la diferencia de temperatura más acusada entre la temperatura registrada en exterior de la cara oeste y aquella medida sobre el piso fue de 14°C y se manifestó a las 18:30 horas, lo cual coincide con la máxima producción de destilado en esta cara.

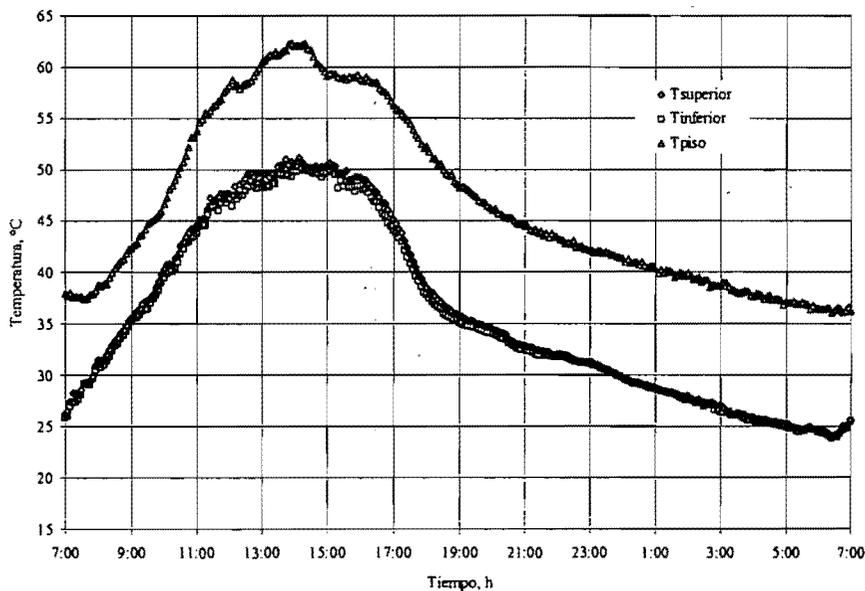


Figura 13. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles de la cara oeste durante la prueba 1.

Como se observa en la fig 14, de la misma forma que en el exterior del destilador, en el interior se presenta un desfase en las temperaturas de las caras este y oeste, de tal manera que la temperatura máxima en la cara este se presenta a la 13:00 horas, mientras que en la oeste esto sucede a las 14:00 horas; los valores de estas temperaturas son de 50 y 55°C , respectivamente. Después de las 17:00 horas las temperaturas en la sección inferior de ambas caras presentan valores muy similares; sin embargo, lo anterior no se ve reflejado en la producción de destilado, ya que durante el periodo nocturno la cara este produce prácticamente la mitad de lo que se obtiene en la cara oeste.

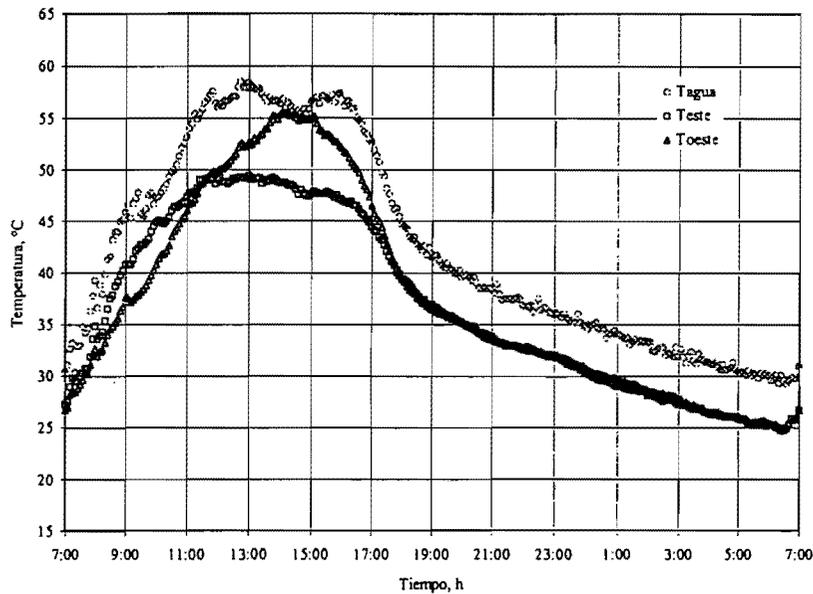


Figura 14. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de la cara este y oeste durante la prueba 1.

Al revisar la fig 15, se observa que la diferencia de temperatura entre el ambiente y el piso del destilador durante el periodo diurno llega a ser hasta de 28°C, aproximadamente, mientras que durante el periodo nocturno esta diferencia es casi constante y presenta un valor cercano a los 15°C. A pesar de estas diferencias tan marcadas la producción diurna y nocturna son muy similares, lo que parece indicar que la temperatura ambiente no ejerce una influencia importante sobre la producción de destilado. Por otro lado, durante la mañana la temperatura del agua y del piso presentaron valores muy cercanos entre sí; sin embargo, después de las 13:00 horas la evolución de las temperaturas del piso y del agua comenzaron a separarse y se observó que después del ocaso la diferencia de temperaturas entre ambas fue de 5°C, aproximadamente. Es de hacer notar que tanto la temperatura de agua como la del piso se mantuvieron durante todo el periodo de prueba prácticamente por arriba de los 30°C, lo cual parece ser debido a la alta inercia térmica del destilador. La temperatura ambiente promedio durante el desarrollo de la prueba 1 fue de 27°C y se registra 25 minutos después del mediodía una temperatura máxima de 34.6°C.

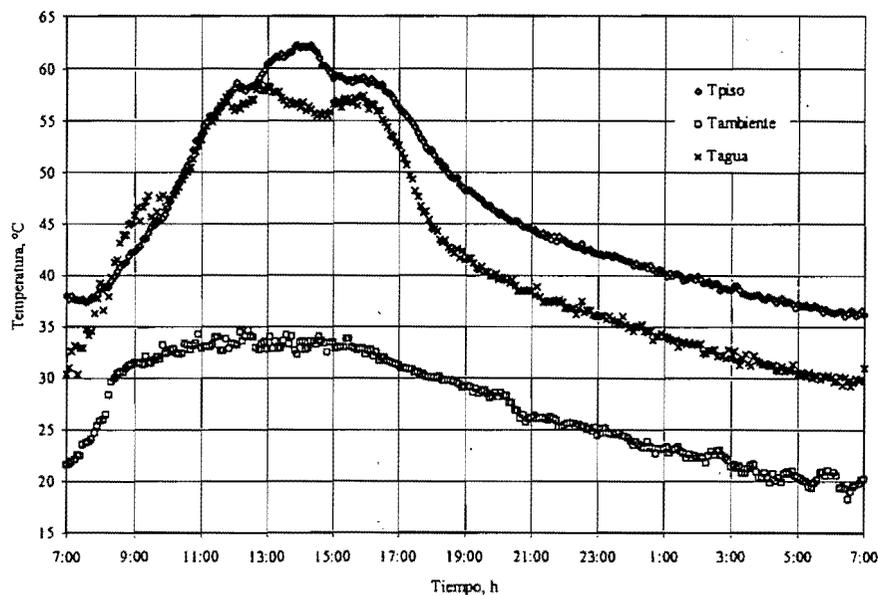


Figura 15. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 1.

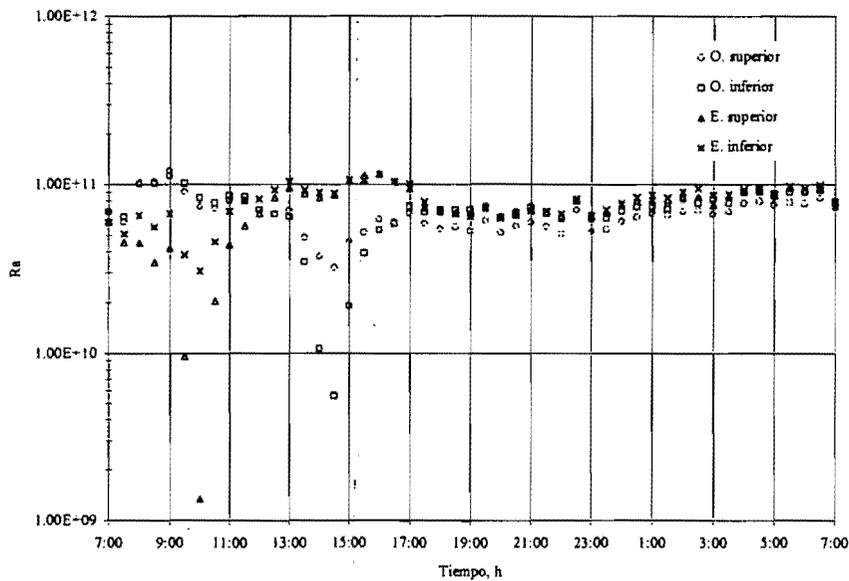


Figura 16. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste durante la prueba 1.

En la fig 16 se presentan los valores del número de Rayleigh obtenidos durante el periodo de prueba y se observa que, con excepción del valor registrado en la sección superior de la cara este a las 10:00 horas y en la cara oeste poco antes de las 15:00 horas, el resto de tiempo el valor del número de Rayleigh en ambos niveles fue del orden de 7.5×10^{10} . Cabe mencionar que los valores más bajos del número de Rayleigh coinciden con una disminución en la producción de destilado y en la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y de los vidrios en el interior del destilador, como se aprecia al revisar las

figs 10, 11 y 14. Por otro lado, Poulikakos y Bejan (1983) reportan que para valores del número de Rayleigh del orden de 4×10^8 en una cavidad con geometría de triángulo rectángulo llena con aire ($Pr = 0.72$) el régimen de flujo es turbulento. Asimismo, Martínez *et al* (1995) observaron en una cavidad triangular llena de aire que para valores del número de Rayleigh del orden de 4×10^6 se evidencia la presencia de capas límite sujetas a inestabilidades. Así, podría decirse que el régimen de flujo en el interior del destilador es turbulento. Sin embargo, lo recomendable es realizar experimentos que permitan visualizar las características del flujo en el interior del destilador, pues la capacidad de transferencia de calor del flujo turbulento difiere drásticamente de su contraparte laminar.

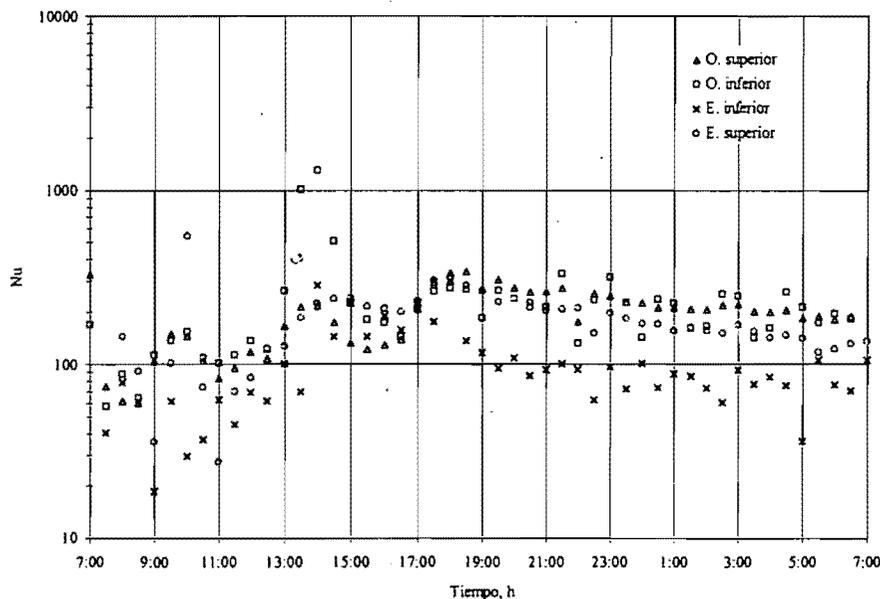


Figura 17. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste durante la prueba 1.

En la fig 17 se observa que el valor del número de Nusselt durante la mañana es mayor en la cara oeste; sin embargo, después de las 17:00 horas el valor de dicho número aumenta en ambas caras, de tal suerte que durante el resto del periodo de prueba el valor promedio del número de Nusselt es de aproximadamente 196. Es de hacer notar, que los valores del número de Nusselt que se presentan en la sección inferior de la cara este después del ocaso son casi de la mitad de aquellos observados en el resto del destilador, lo cual contrasta con lo observado para el número de Rayleigh, donde éste mantiene valores semejantes para ambas caras y niveles después del ocaso. Así, parece que la disminución del valor del número de Nusselt se debe a la presencia de alguna fuga en el canal inferior y

puede suponerse que el valor esperado del número de Nussel sería del mismo orden del que en promedio se presentó en la sección superior, a saber, 170.67.

Prueba 2: tirante de 4 cm.

La producción total de destilado durante el periodo de prueba fue de 105 l, con un máximo de 0.14 l/min a las 17:00 horas, una hora antes del ocaso; después de ese instante la producción comenzó a declinar, como se observa en la figura 18. En el transcurso de esta prueba se observó un efecto más acusado de la inercia térmica sobre la producción de destilado que el registrado en la prueba 1. Así, durante el periodo nocturno la producción de destilado en la prueba 2 representó casi el 52% del total.

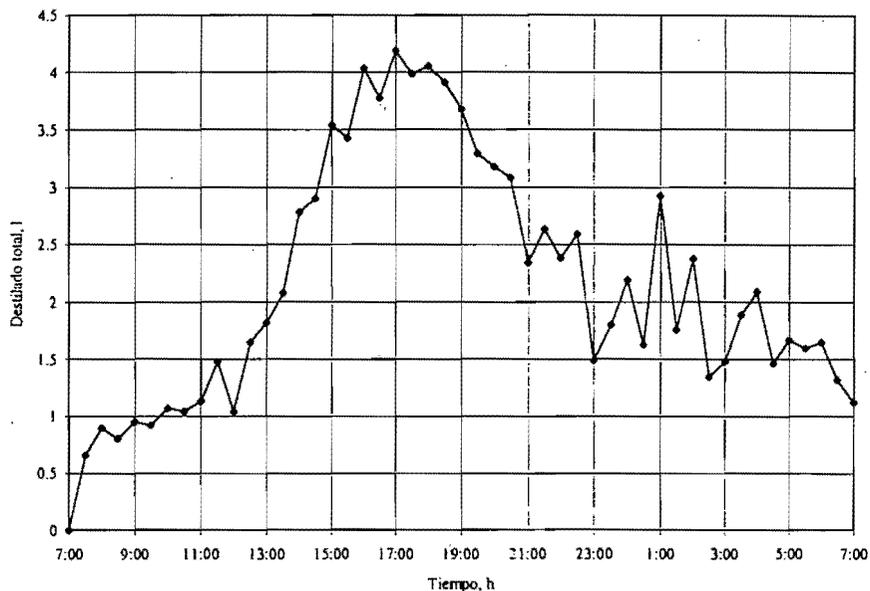


Figura 18. Producción total de destilado durante la prueba 2.

El destilado total recolectado en la cara este fue de 53.1 l, con una producción pico a las 16:00 horas. En contraste con lo ocurrido en la prueba 1, en la fig 19 se aprecia que la producción de destilado tanto en la sección superior como en la inferior fue muy semejante, de tal manera que de lo obtenido en la cara este en ésta última se produjo el 47%, mientras que en la sección superior fue el 53%. Del destilado total recolectado en la cara este, el 50% se obtuvo durante el periodo nocturno, con la mitad en la sección inferior y la otra mitad en la sección superior.

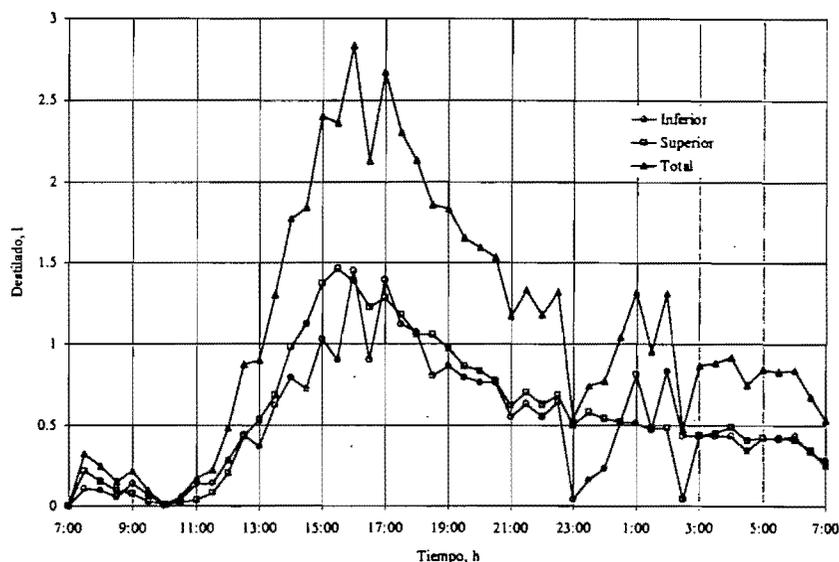


Figura 19. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 2.

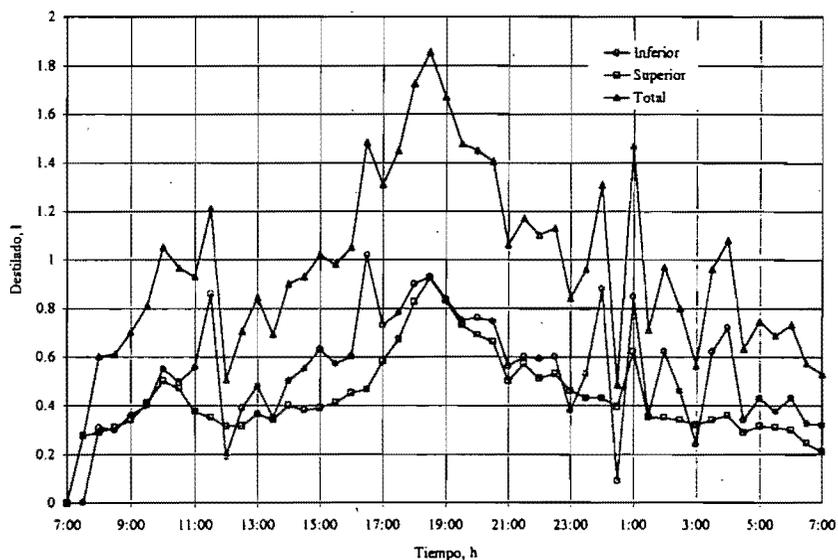


Figura 20. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 2.

Como se observa en la fig 20, la producción máxima en la cara oeste se presentó media hora después del ocaso. Del destilado total recolectado en esta prueba, el 45% se obtuvo en la cara oeste, 20% se generó en la sección superior y el 25% restante en el inferior. Por otro lado, en esta cara se produjo el 46% del destilado total recolectado durante el periodo nocturno. Además, el 54% de lo producido por la cara oeste durante el transcurso de la prueba se obtuvo en el periodo nocturno.

De la misma forma que ocurre en la prueba 1, durante la prueba 2 en la cara este se observa que de las 9:00 a las 11:00 horas la diferencia de temperatura entre el exterior de la cubierta de vidrio y el piso es muy reducida, como se ve en la fig 21. Cabe señalar que en ambas pruebas, durante el periodo de tiempo señalado, se observa que la producción de destilado en la cara este disminuye. Después de las 11:00 horas y durante el resto de la prueba la diferencia promedio es de 12.5°C , aproximadamente. Por otro lado, aunque que en la prueba 1 las temperaturas de las cubiertas llegaron a presentar valores de más de 50°C y que en la prueba 2 las temperaturas no pasaron de los 48°C , las gráficas de las temperaturas en la prueba 1 y 2 son muy similares.

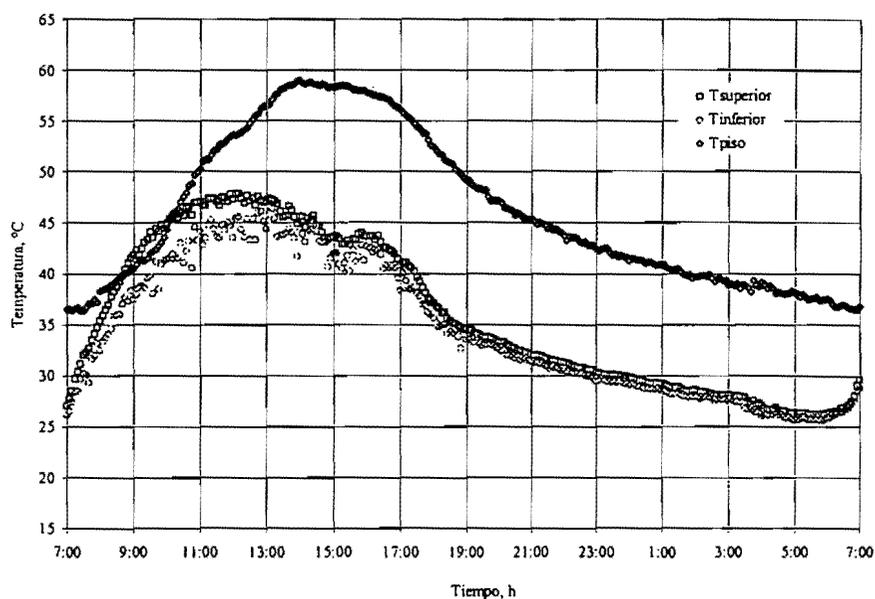


Figura 21. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara este durante la prueba 2.

Al igual que en la prueba 1, las temperaturas registradas en la prueba 2 en ambos niveles en el exterior de la cubierta de la cara oeste son muy similares, como se muestra en la fig 22. Además, los valores de las temperaturas en ambas pruebas son semejantes, sólo que se encuentran ligeramente desfasadas; no obstante lo anterior, en ambas pruebas, la diferencia más alta entre el piso y la cubierta en la cara oeste, se presentó a las 18:30 coincidiendo también con el instante en que se presentó la mayor producción de destilado. Por otro lado, al contrario de lo que ocurre en la cara este, en la cara oeste la diferencia de temperatura durante el periodo de tiempo que va de las 9:00 a las 11:00 horas fue de 7°C ,

aproximadamente, lo cual puede explicar el hecho de que durante este periodo se presente destilado en la cara oeste y no en la este.

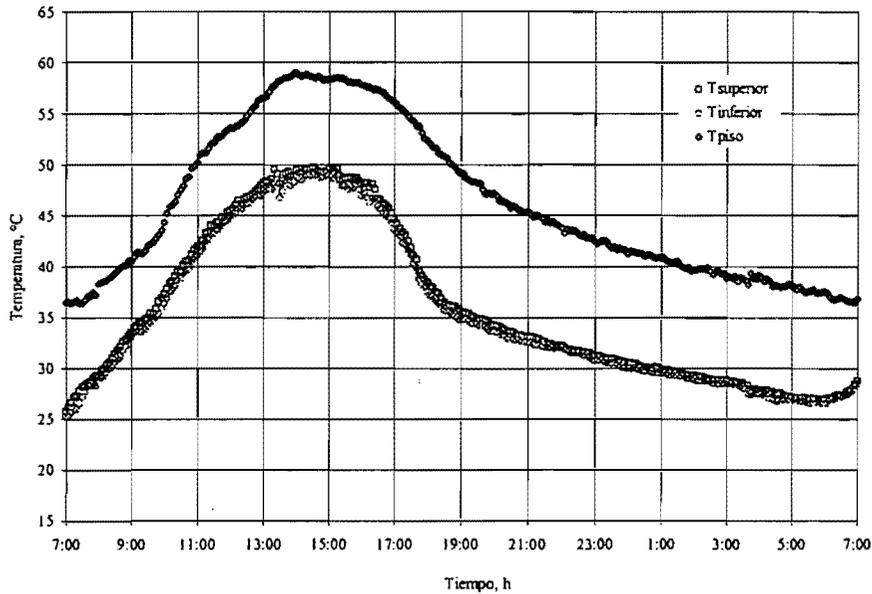


Figura 22. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara oeste durante la prueba 2.

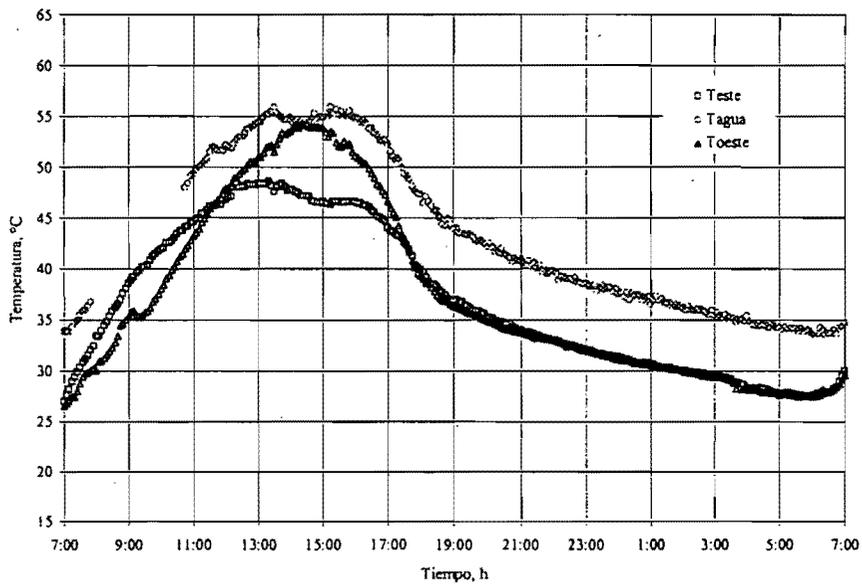


Figura 23. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de ambas caras durante la prueba 2.

Al comparar la fig 14 con la fig 23, se observa que la forma en que evolucionan las temperaturas en ambas pruebas es similar; no obstante, en la prueba 2 las temperaturas son

menores que en la prueba 1. Sin embargo, en esta prueba la diferencia de temperaturas entre el piso y las cubiertas es mayor; en particular, durante el periodo nocturno esta diferencia llega a ser hasta 2°C a la registrada en ese mismo periodo en la prueba 1. Considerando el efecto de la inercia térmica debido al incremento de la masa de agua en el interior del destilador, lo anterior puede explicar el aumento del 15% en la producción de destilado nocturno de la prueba 2 con respecto a la prueba 1.

La temperatura ambiente promedio en la prueba 2 presentó el mismo valor que el obtenido en la prueba 1; asimismo, la temperatura ambiente más elevada se registró a las 12:35 horas y fue de 33.6°C. Al revisar la fig 24 se puede ver que la diferencia de temperatura entre el ambiente y el piso del destilador durante el periodo diurno fue de un poco más de 21°C, mientras que durante el periodo nocturno esta diferencia fue 2°C más alta que la registrada en la prueba 1. De la misma forma que en la prueba 1, en la prueba 2 hasta las 13:00 horas la temperatura del agua y del piso presentaron valores muy cercanos entre sí; sin embargo, a diferencia de lo ocurrido en la prueba 1 en que la temperatura del agua llegó a disminuir hasta los 30°C, durante esta prueba la temperatura registrada en el agua se mantuvo prácticamente durante todo tiempo por arriba de los 35°C.

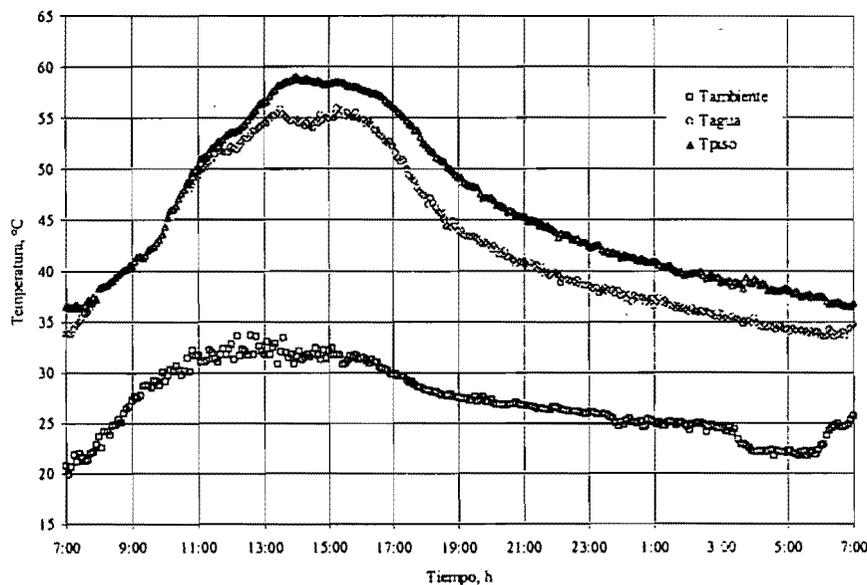


Figura 24. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 2.

Los valores del número de Rayleigh se encuentran dentro del rango de 1.4×10^8 a 1.2×10^{11} , como se muestra en la fig 25. De manera similar a lo que ocurre la prueba 1, los

valores más bajos del número de Rayleigh en ambas caras coinciden con una disminución en la producción de destilado y en la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y de los vidrios en el interior del destilador. No obstante lo anterior, aquí los valores del número de Rayleigh se encuentran concentrados en un rango más estrecho, lo que puede deberse al incremento de la inercia térmica sobre el comportamiento de las diferencias de temperaturas.

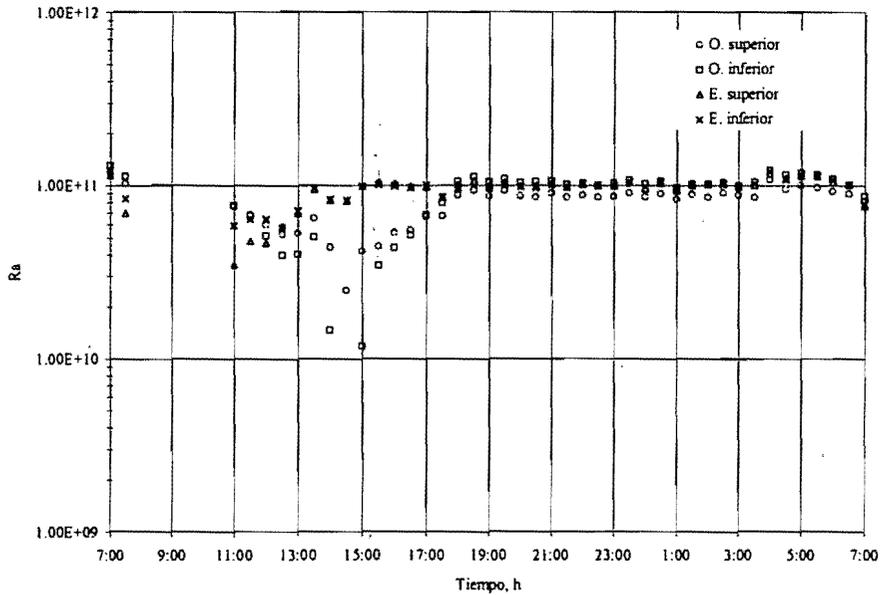


Figura 25. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 2.

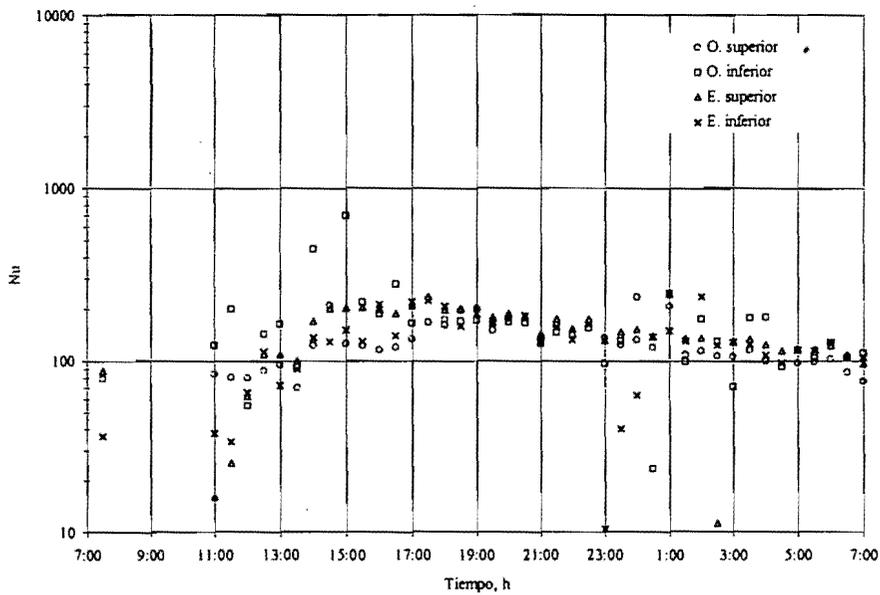


Figura 26. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 2.

Durante la prueba 2 el valor promedio del número de Nusselt fue de 142, 17% menor que el registrado en la prueba 1; los valores más elevados del número Nusselt se presentaron en la sección inferior de la cara oeste, como se advierte en la fig 26.

Prueba 3: tirante de 6 cm.

De los tres tirantes ensayados el utilizado en esta prueba registró la menor producción total de destilado, siendo ésta de aproximadamente 90 l. Sin embargo, porcentualmente, la producción nocturna de destilado fue mayor a las dos pruebas anteriores y representó el 56% del total.

En la fig 27 se advierte que la máxima producción de destilado se registró a las 18:00 horas, una y tres horas después de lo registrado en las pruebas 2 y 1, respectivamente. Así pues, a pesar de que entre una prueba y otra el incremento de la masa de agua fue el mismo, el efecto sobre el comportamiento del destilador tiende a disminuir conforme se incrementa la inercia térmica.

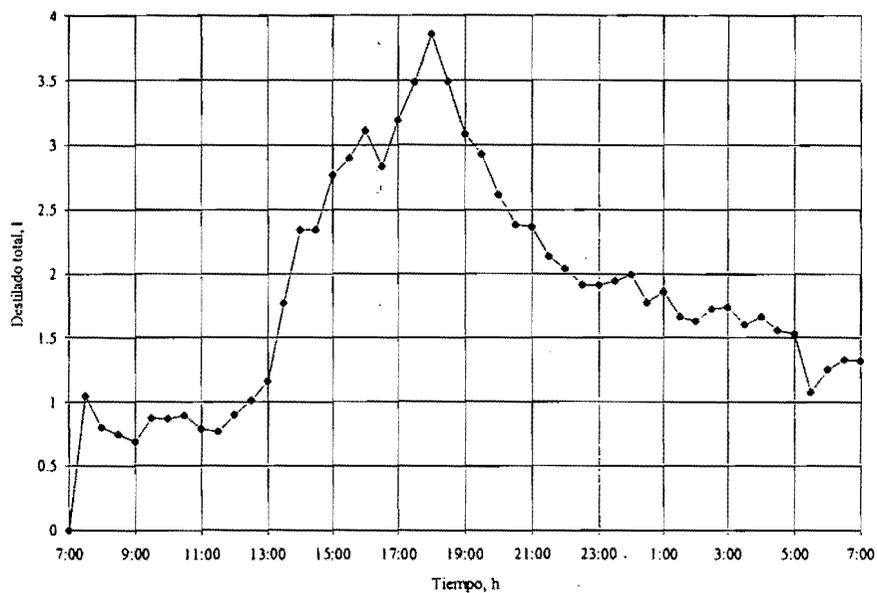


Figura 27. Producción total de destilado durante la prueba 3.

En la prueba 3, en la cara este se recolectó el 46% de la producción total. Hay que señalar que del destilado total recolectado en la cara este, el 53% se obtuvo durante el periodo nocturno, como cabría esperar debido al incremento de la inercia térmica. En la fig 28 se observa que en la sección superior se recolectó mayor cantidad de destilado, de tal

suerte que del total recolectado el 26% se obtuvo en esta sección, mientras que el correspondiente a la sección inferior fue 20%.

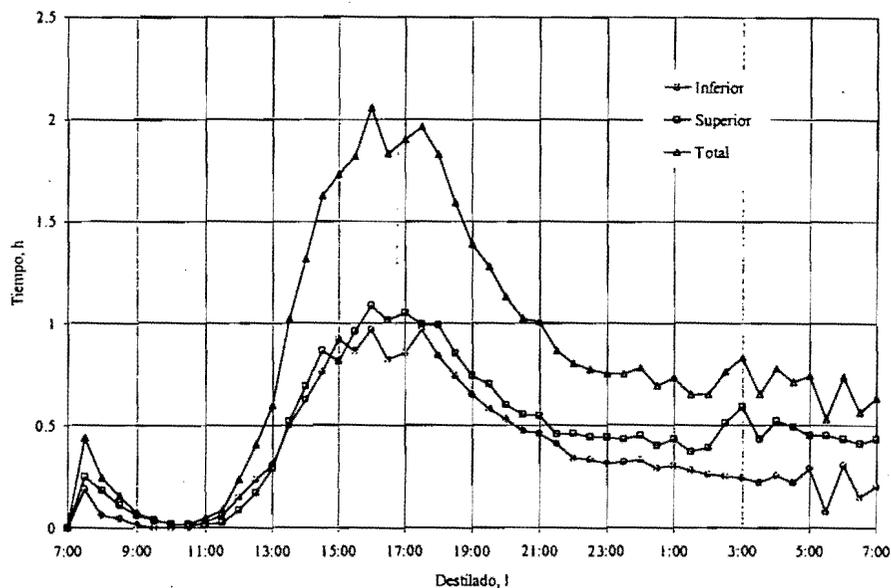


Figura 28. Producción de destilado en la cara este durante la prueba 3.

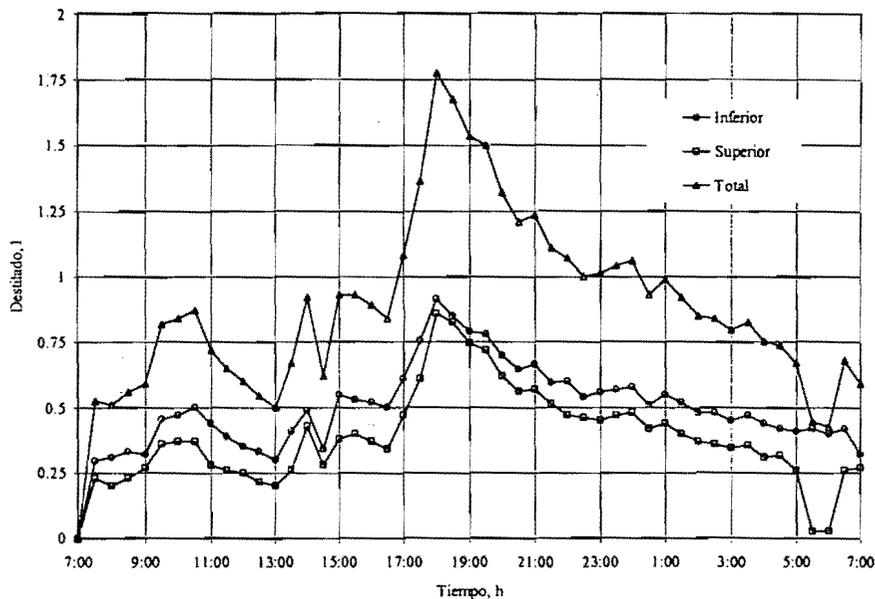


Figura 29. Producción de destilado en la cara oeste durante la prueba 3.

Durante esta prueba se recolectó la mayor cantidad de agua destilada en la cara oeste, siendo así que lo obtenido en esta cara representa el 48% de la producción total. durante el periodo nocturno se recaudó 59% del total producido en la cara oeste. En la fig

29 se aprecia que a diferencia de lo ocurrido en la cara este en esta cara se colecta más agua destilada en la sección inferior que en la superior, 21 y 27%, respectivamente.

Al comparar las figs 12, 21 y 30 se aprecia que durante el periodo diurno conforme se incrementa el tirante las temperaturas en la sección inferior y superior de la cara este tienden a ser más semejantes y a presentar valores más reducidos. Así, mientras que en la prueba 1 se llegan a presentar en ambas secciones temperaturas de casi 55°C y en la prueba 2 más de 47°C, en la prueba 3 estas temperaturas sólo llegan a ser un poco mayores de 45°C. Al parecer a medida que se presenten temperaturas más elevadas se favorece la producción de destilado. Lo anterior se hace más evidente si señalamos que la diferencia entre la temperatura del piso y la temperatura promedio de ambas secciones en las tres pruebas es muy semejante después de las 13:00 horas y prácticamente igual después del ocaso.

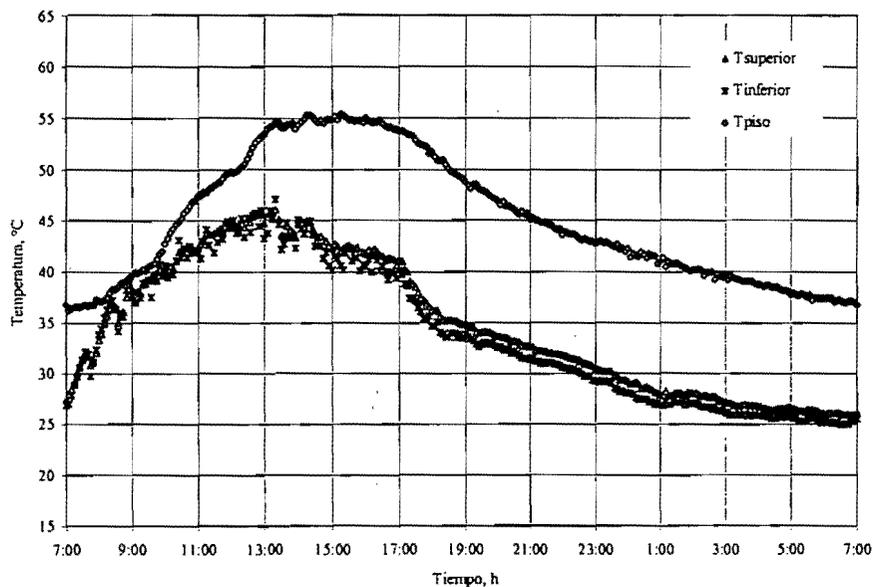


Figura 30. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara este durante la prueba 3.

Asimismo, al revisar las figs 13, 23 y 31 se aprecia que algo semejante ocurre en la cara oeste en las tres pruebas. De esta suerte, la diferencia entre la temperatura del piso y la promedio de ambas secciones después del ocaso es para los tres tirantes ensayados de 12°C, aproximadamente.

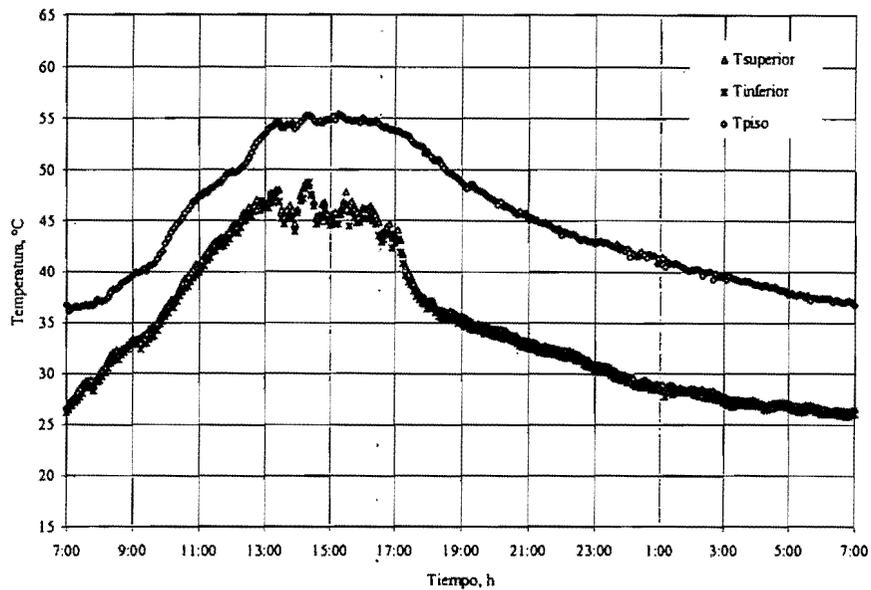


Figura 31. Evolución de las temperaturas en el piso y el exterior de ambos niveles en la cara oeste durante la prueba 3.

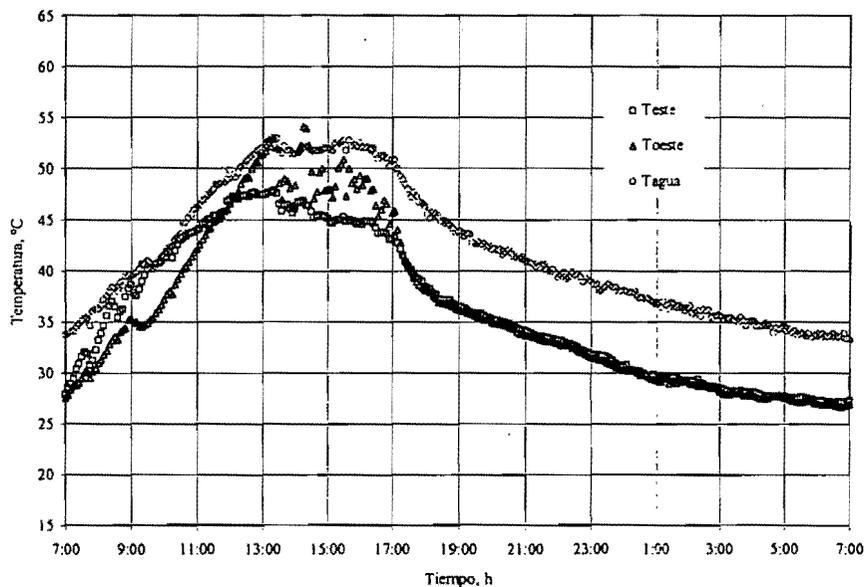


Figura 32. Evolución de las temperaturas en el agua y en el interior de la sección inferior de ambas caras durante la prueba 3.

Como se puede apreciar al revisar las figs 14, 23 y 32, a pesar de que la evolución de las temperaturas en el interior del destilador correspondientes a la sección inferior de las cubiertas este y oeste de las tres pruebas son semejantes, la relación que estas temperaturas guardan con la temperatura del agua es diferente. Por un lado, se ve que durante el periodo diurno a medida que el tirante disminuye la diferencia de temperatura entre el agua y las

cubiertas aumenta; mientras que, por otro lado, a medida que aumenta el tirante esta diferencia tiende a aumentar durante el periodo nocturno. Lo anterior parece explicar que la producción nocturna se eleve a medida que se incremente la masa de agua utilizada.

La temperatura ambiente presentó un comportamiento semejante al observado en las pruebas anteriores, el valor promedio de ésta fue de 26.5°C . En cuanto a las temperaturas del piso y el agua, se advierte en la fig 33 que al igual que en la prueba 2 la temperatura del agua y del piso en esta prueba no disminuye de los 35°C . Sin embargo, en la prueba 2 la temperaturas en el agua y en el piso alcanzan valores más altos que en la prueba 3; además en esta prueba el periodo de tiempo en que la temperatura en el agua y el piso se mantienen por arriba de los 45°C es menor que en la prueba 2 debido a que en ésta, debido al efecto de la inercia térmica, las temperaturas se elevan más rápidamente que en la prueba 3. Lo anterior, parece afectar la producción de destilado, ya que al aumentar la temperatura del agua la producción de destilado aumenta, como se observa al comparar las figs 8, 17 y 26 con las figs 14, 23 y 32.

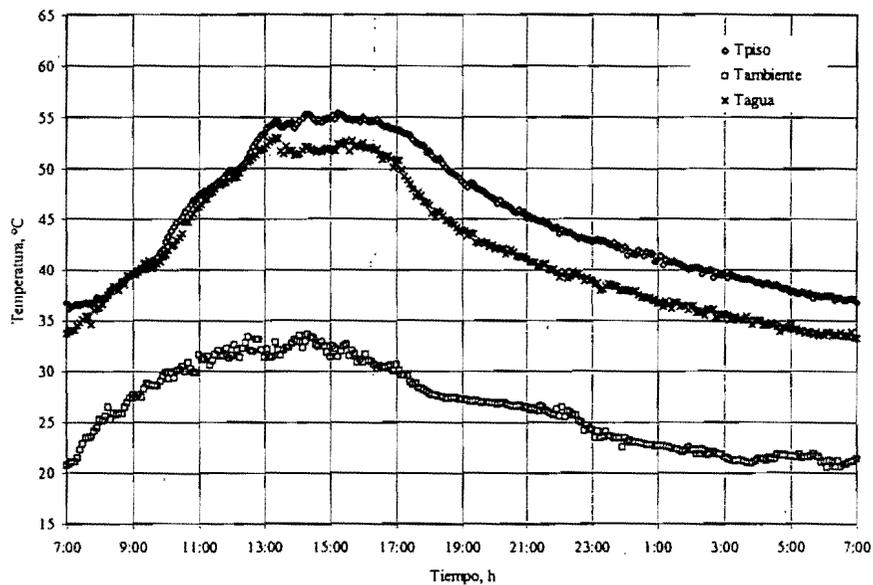


Figura 33. Evolución de las temperaturas en el piso, el agua y el ambiente durante la prueba 3.

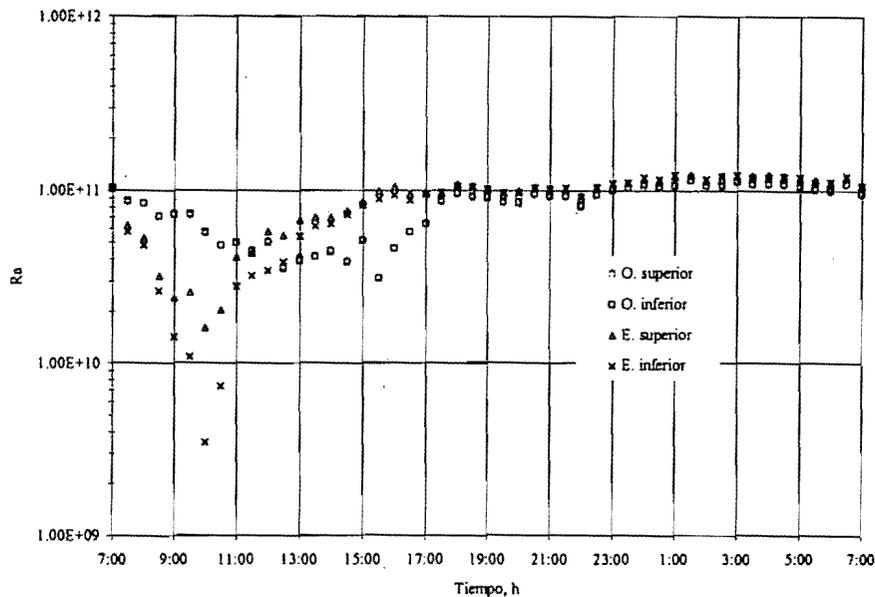


Figura 34. Números de Rayleigh obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 3.

En las figs 16, 25 y 34 se observa que después de las 17:00 horas el valor del número de Rayleigh en todas las secciones del destilador tiende a presentar poca variación manteniendo valores del orden de 1×10^{11} . Así mismo, al revisar las gráficas de producción de destilado de las tres pruebas se aprecia que las reducciones del número de Rayleigh coinciden con una disminución de la producción de destilado. Lo anterior parece indicar que si disminuye la diferencia de temperatura entre el vidrio y la superficie del agua el transporte de vapor se reduce.

Durante la prueba 3 el valor promedio del número de Nusselt fue de 118.97, 31% más reducido que el registrado en la prueba 1 y 17% menor que la prueba 2, esta puede deberse a que en esta prueba las temperaturas en el interior del destilador disminuyeron notablemente con respecto a las dos pruebas anteriores. Sin embargo, de la misma forma que en la prueba 2, los valores más elevados de Nu se presentaron en la sección inferior de la cara oeste, como se advierte en la fig 35.

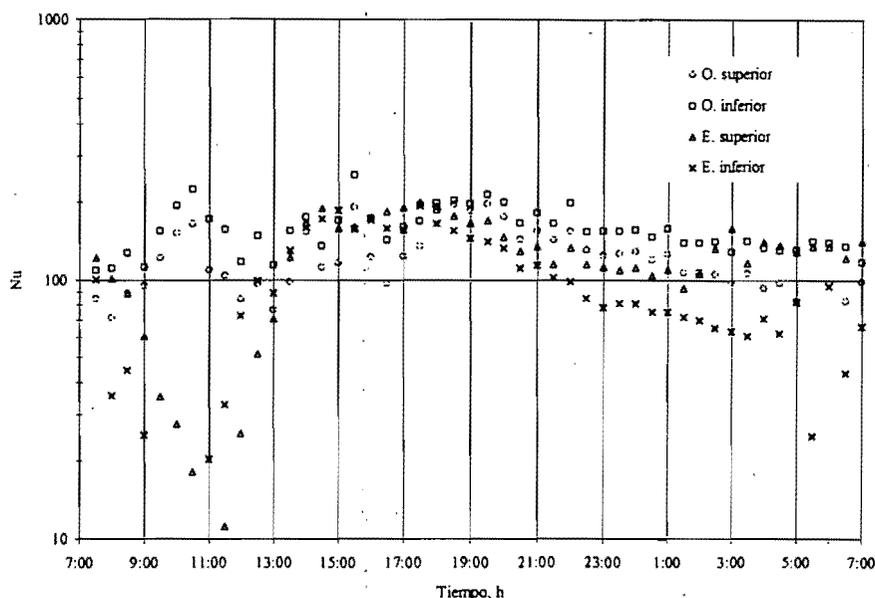


Figura 35. Números de Nusselt obtenidos en ambos niveles de las caras este y oeste para la prueba 3.

Al revisar la tabla 1, se observa que durante los tres días en que se realizaron las pruebas tanto la energía incidente como la velocidad promedio del viento presentaron valores prácticamente iguales; sin embargo, el comportamiento global del destilador es diferente, siendo así que la prueba que presenta mejores características de funcionamiento es la prueba con tirante de 4 cm. Al parecer, un tirante de 4 cm combina las características de funcionamiento de los tirantes de 2 y 6 cm, al permitir, por un lado, que se incremente rápidamente la temperatura durante las primeras horas del día y, por el otro, al mantener valores elevados de temperatura con respecto al exterior durante el periodo nocturno.

Tabla 1. Datos de funcionamiento del destilador para los tirantes ensayados

Prueba	Energía incidente, MJ/m^2	Productividad, $kg/m^2 día^a$	Eficiencia, %	Velocidad del viento, m/s^b
1	19.5	2.23	25.77	0.51
2	19.2	2.24	26.21	0.43
3	19.5	1.90	22.03	0.48

También en la tabla 1 se aprecia la notable disminución de la productividad y la eficiencia del destilador al aumentar la masa de agua, lo cual es más evidente si observamos

^a Base = 47 m²

^b Promedio

que durante la prueba 2 los valores tanto de la energía incidente como la velocidad del aire fueron menores que los registrados durante la prueba 3.

Prueba 4: tirante de 4 cm, medición de temperaturas en nivel superior de la cara este.

Durante esta prueba los termopares del 1 al 6 y el colocado sobre el vidrio registraron en la dirección vertical una drástica variación de la temperatura, la cual fue particularmente acentuada en los primeros dos milímetros de las 7:00 y las 12:00 horas, como se aprecia en la fig 36. Así mismo, se observa que durante este periodo el perfil crece mientras que de las 13:00 horas en adelante disminuye y mantiene una forma similar de las 19:00 en adelante.

En cuanto a los termopares colocados en las inmediaciones de la superficie del agua, fig 37, se observa que durante las primeras 6 horas de la prueba la temperatura del aire es superior a la temperatura de la superficie del agua, lo que parece indicar que durante este periodo de tiempo el aire es el responsable de calentar al agua. Después de las 18:00 horas el proceso anterior parece invertirse.

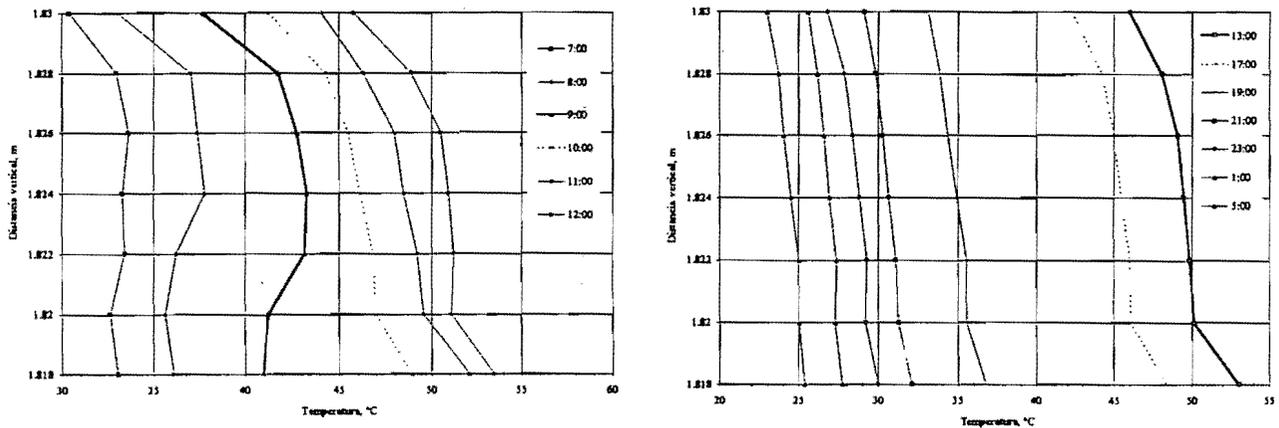


Figura 36. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 4.

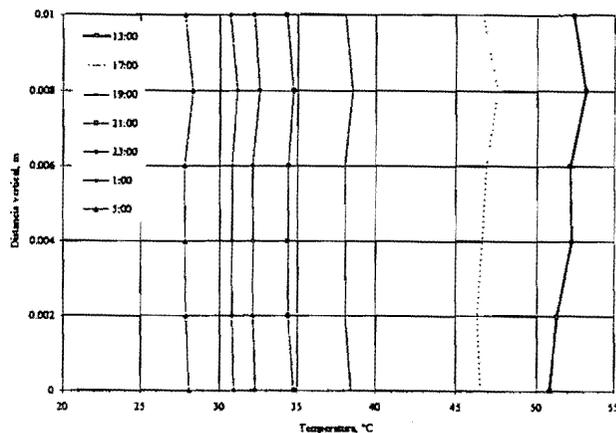
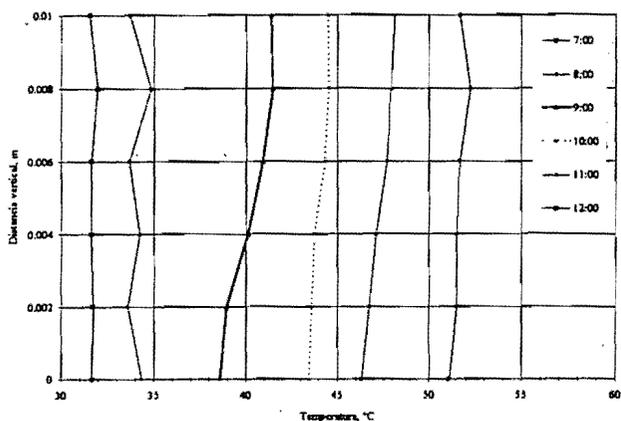


Figura 37. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 4.

Prueba 5: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel inferior de la este.

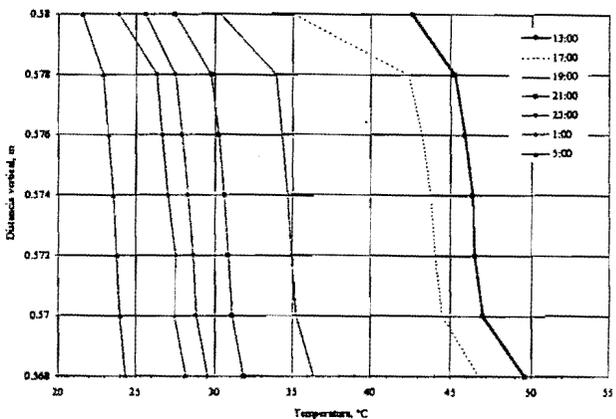
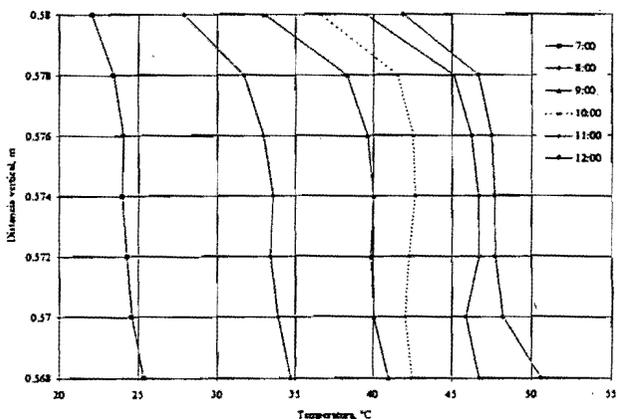


Figura 38. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 5.

En la sección inferior de la cara este los termopares correspondientes a los mostrados en la fig 38, presentaron un comportamiento similar al apreciado en la prueba anterior; sin embargo, en la prueba 5 se observa que después de las 8:00 horas la variación de la temperatura en la dirección vertical a lo largo de los primeros 2 mm es casi el doble de lo registrado en la prueba 4. No obstante, después de los primeros 2 mm, se aprecia que en la sección inferior el gradiente de temperatura es menos pronunciado que el observado en la sección superior, lo cual puede verse al comparar los perfiles de la figs 36 y 38. Al comparar los perfiles de las figs 37 y 39 se observa que la variación de la temperatura es menos pronunciada en los termopares del 7 al 12; sin embargo, es evidente como los perfiles de temperatura presentan inestabilidades durante todo el periodo de prueba. Hay que señalar que las pruebas 4 y 5 se realizaron en días diferentes, pese a ello la radiación incidente es

muy similar en ambos días. En la tabla 2 se sintetizan los datos de funcionamiento de las pruebas 4, 5, 6, 7 y 8.

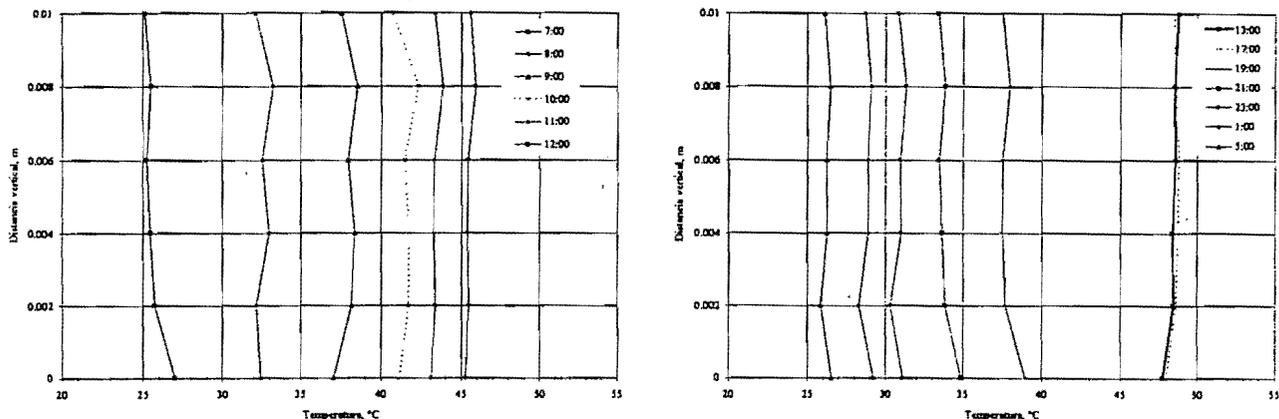


Figura 39. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 5.

Tabla 2. Datos de funcionamiento del destilador para las pruebas 4, 5, 6, 7 y 8.

Prueba	Energía incidente, MJ/m^2	Productividad, $kg/m^2 día^e$	Eficiencia, %	Velocidad del viento, m/s^d
4	20.3	2.23	24.7	0.57
5	19.2	1.85	21.7	0.42
6	7.5	0.86	26.0	0.59
7	8.4	0.77	20.7	0.44
8	12.6	1.15	20.7	0.58

Prueba 6: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel superior de la cara oeste.

A pesar de que las condiciones de operación del destilador correspondientes a la prueba 4 y 6 son considerablemente diferentes, vale la pena comparar los resultados de estas pruebas. Así, al observar los resultados mostrados en las figs 40 y 41 se aprecia que durante casi todo el tiempo que dura la prueba, la temperatura del agua es mayor a la del aire, lo cual parece indicar que el responsable del gradiente de temperatura en el lado oeste del destilador es el agua; lo cual contrasta con lo que ocurrió en la prueba 4 donde este comportamiento se presentó sólo después del ocaso.

^e Base = 47 m²

^d Promedio

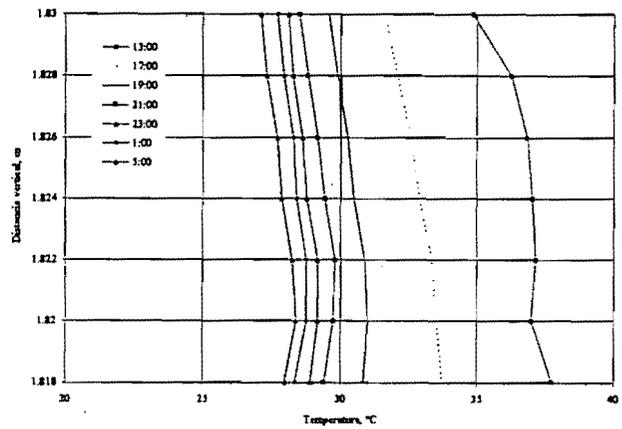
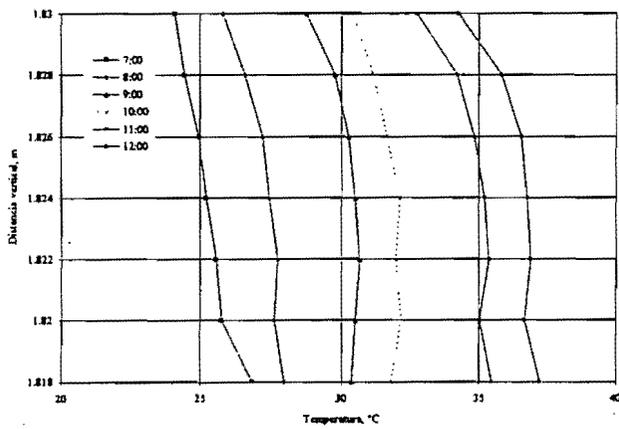


Figura 40. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 6.

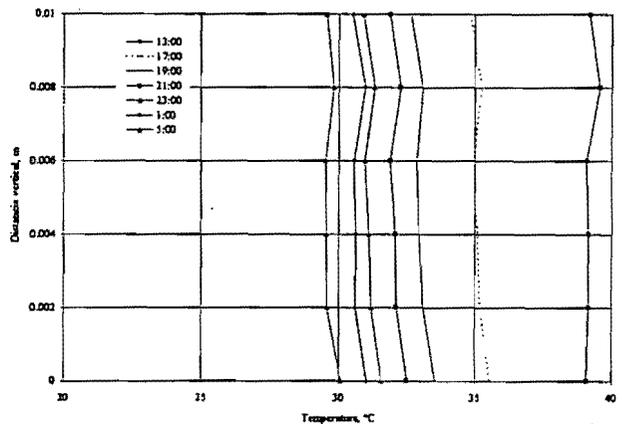
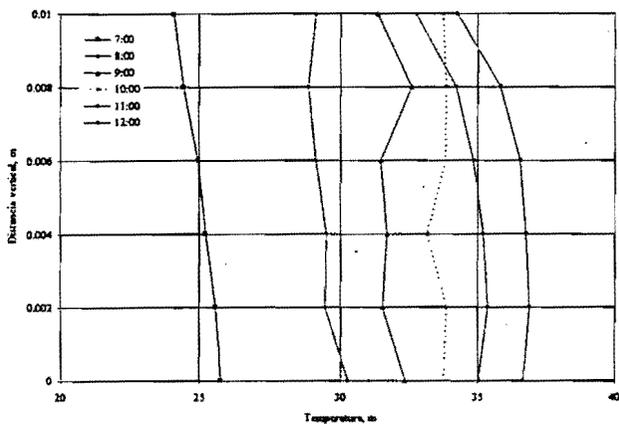


Figura 41. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 6.

Prueba 7: tirante 4 cm, medición de temperaturas en el nivel inferior de la cara oeste.

A diferencia de lo que ocurre en las pruebas anteriores en donde se observa un gradiente de temperatura entre el termopar 6 y el colocado sobre el vidrio en el interior del destilador, acentuado en las pruebas 4 y 5 y ligero pero notable en la prueba 6, en la prueba 7 los termopares mencionados presentaron prácticamente la misma temperatura durante casi todo el periodo de prueba, como se observa en la fig 42; no obstante, se observa la presencia de un gradiente considerable después del termopar 6. El comportamiento de los termopares del 7 al 12 en la prueba 7 fue similar al observado en la prueba 6.

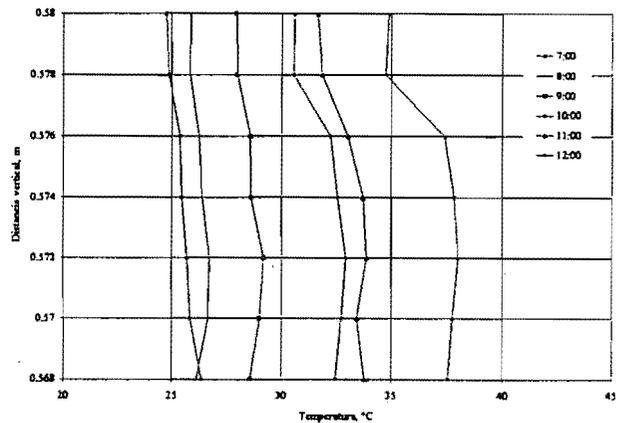
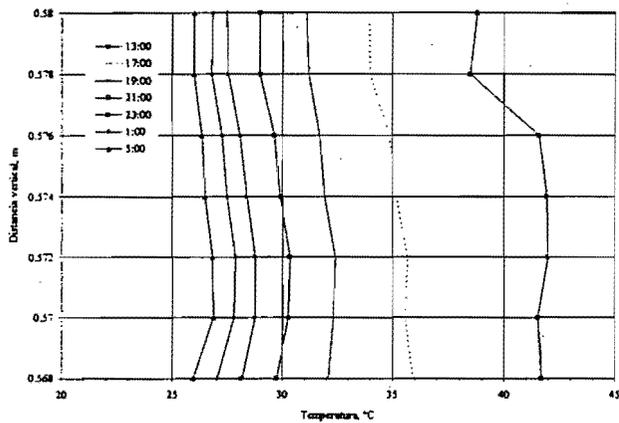


Figura 42. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 1 al 6 y sobre la superficie interior del vidrio en la prueba 7.

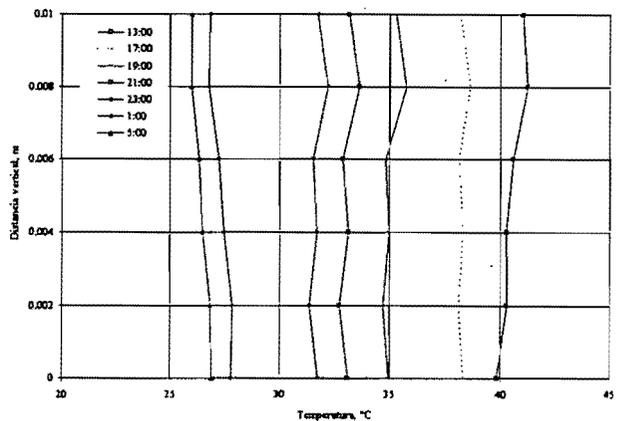
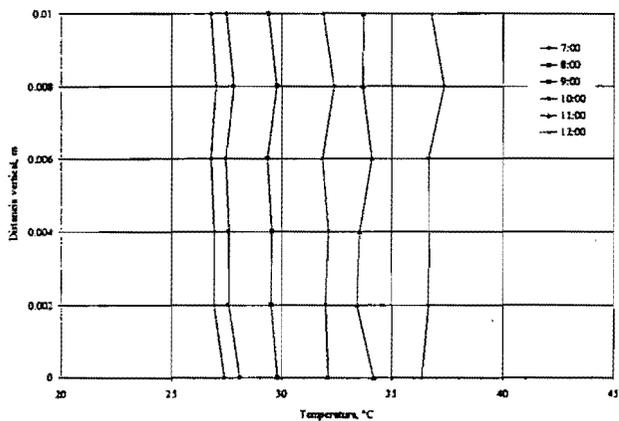


Figura 43. Perfil de temperaturas registradas en los termopares del 7 al 12 en la prueba 7.

Prueba 8: tirante 4 cm, medición de temperaturas en la sección central del destilador.

En la fig 44 se puede apreciar que después del ocaso hasta el amanecer la zona central del destilador tiene un comportamiento isotérmico. Sin embargo, se observa que existe un marcado gradiente de temperatura durante todo el día en la zona comprendida entre los dos primeros milímetros a partir de la superficie del agua, donde la temperatura de la superficie del agua es siempre mayor que la del aire. Lo anterior no se verifica durante el periodo que va de las 11:00 a las 15:00 horas, durante el cual se presentan los valores más elevados de radiación, como se aprecia en la fig 45, lo que parece indicar que durante un día con radiación solar normal el aire calienta la superficie del agua hasta el ocaso, después del cual es la energía contenida en la masa de agua la responsable de mantener en funcionamiento el destilador.

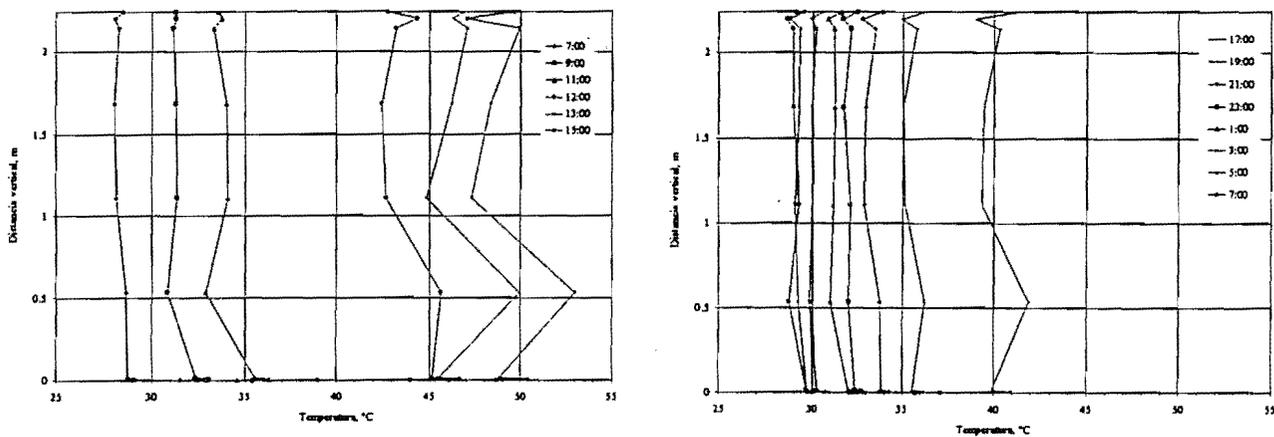


Figura 44. Perfil de temperaturas registradas en los termopares en la prueba 8.

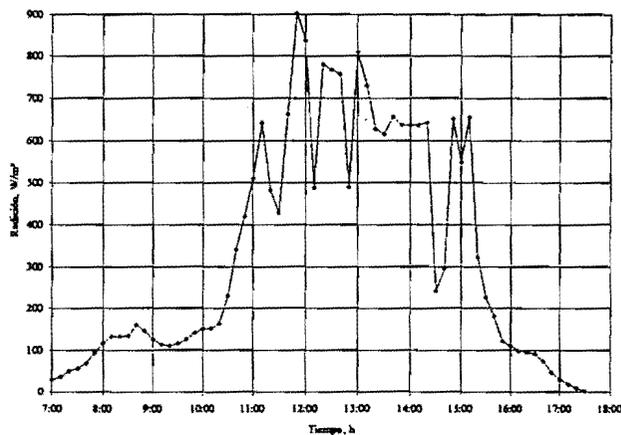


Figura 45. Radiación solar incidente durante la prueba 8.

Durante el transcurso de las últimas 4 pruebas se realizó el registró de la temperatura en la parte inferior del piso del destilador, apreciándose en la fig 45 que la variación de ésta es muy reducida.

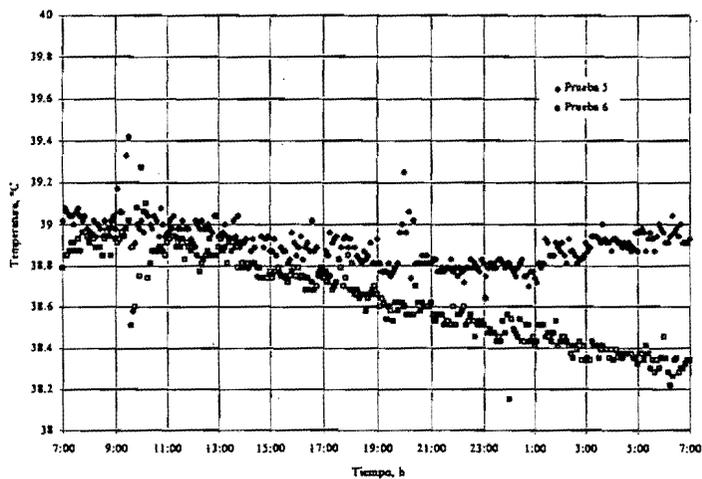


Figura 46. Variación de la temperatura en la parte inferior del destilador.

El efecto de la inercia térmica sobre el funcionamiento del destilador solar se aprecia mejor si lo estudiamos a la luz del factor de esbeltez para la inercia térmica, S_r , el cual se define como la relación entre la máxima distancia vertical entre las curvas de producción matutina y vespertina dividida entre la ordenada máxima (Porta y Fernández, 1993). En forma de ecuación,

$$S_r = \frac{\Delta Y}{Y_{\max}} ; 0 \leq S_r \leq 1$$

En la fig 47 se muestran los valores de S_r para los tres tirantes ensayados. En los tres casos se observa que al inicio la producción de destilado es lenta, incrementándose después de que alcanza la máxima irradiación; además, a medida que el tirante aumenta la producción máxima ocurre en un momento más cercano al ocaso. Para los tres tirantes se observa que gran parte de la producción se presenta después de que el sol se ha ocultado.

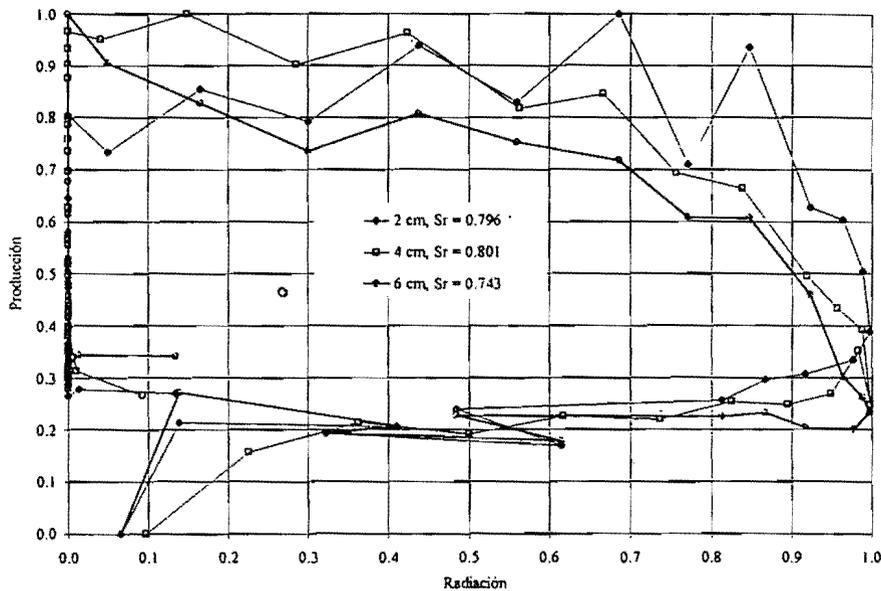


Figura 47. Relaciones adimensionales de producción y radiación para los tres tirantes ensayados.

Conclusiones y recomendaciones

El flujo de calor en la sección inferior y superior de ambas caras puede considerarse igual, así, puede decirse que la distancia entre la superficie del agua y el vidrio no influye de manera apreciable en la producción de destilado. Por otro lado, la diferencia entre el flujo de calor de la cara este y oeste es notoriamente diferente.

El promedio del factor de esbeltez de la inercia térmica, S_r , para los tirantes ensayados es de 0.77. Este resultado y el comportamiento observado en el destilador de prueba es congruente con lo reportado por Porta y Fernández (1983), quienes mencionan que para valores elevados del factor S_r una gran porción de la producción diaria del destilado se presenta después de que el sol se ha puesto. Así, el efecto de la inercia térmica en el interior del destilador es el responsable de que durante el periodo nocturno se obtenga hasta el 50% de la producción diaria. Esta característica distingue el comportamiento del destilador bajo prueba del correspondiente a los destiladores reportados en la bibliografía, en los cuales la producción se detiene poco tiempo después del ocaso. Además, la producción nocturna se eleva al incrementar el tirante. Asimismo, el porcentaje de destilado producido en la cara oeste se incrementa al aumentar el tirante.

La eficiencia promedio del destilador para los tres tirantes ensayados es de 24.7%, observándose que la eficiencia de operación es sumamente dependiente del tirante inicial de agua y, en general, de la inercia térmica debida a los materiales de construcción. La eficiencia del destilador bajo prueba es de la mitad de la reportada para destiladores solares simples de una sola agua (Porta y Fernández, 1993; Yadav y Prasad, 1991; McCracken y Porta, 1990), en los cuales los efectos del almacenamiento de calor en el fondo y la cubierta son despreciables.

En el interior del destilador se aprecian grandes fluctuaciones de la temperatura en las zonas cercanas a las paredes. De acuerdo a la bibliografía consultada los valores del número de Rayleigh ($1.5 \times 10^{10} < Ra < 9.4 \times 10^{10}$) obtenidos en este trabajo corresponden a regímenes de flujo turbulento. El valor promedio del número de Nusselt es de 144 y aumenta conforme el tirante disminuye.

Es conveniente realizar mediciones de temperatura en la dirección vertical en el interior del destilador que permitan observar el desarrollo de la capa límite en las secciones superior e inferior de manera simultánea. Además, es recomendable realizar visualización del flujo de aire y de vapor en el interior del destilador..



Bibliografía

- Adhikari R. S., Kumar A. y Kumar A. 1990. "Estimation of Mass Transfer Rates in Solar Stills". *International Journal of Energy Research*. 14, 737-744.
- Aghareed M. T. 1992. "Performance Study of Some Designs of Solar Stills". *Energy Convers. & Mgmt.* 33, 889-898.
- Baibutaev K. B., Achilov B. M. y Kamaeva G. 1970. "Effect of Salt Concentration on the Evaporation Process in Solar Stills". *Geliotekhnika*. 6, 83.
- Baum V.A. y R. Bairamov R. 1964. "Heat and Mass Transfer Processes in Solar Stills of Hotbox Type". *Solar Energy*. 8, 78-82.
- Bejan A. 1984. "Convection Heat Transfer". John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.
- Clark J.M. 1990. "The Steady-State Performance of a Solar Still". *Solar Energy*. 44, 43-49.
- Cooper P. I. 1969a. "Digital Simulation of Transient Solar Still Processes". *Solar Energy*. 12, 313-331.
- Cooper P. I. 1969b. "The Absorption of Radiation in Solar Stills". *Solar Energy*. 12, 333-346.
- Cooper P. I. 1972. "Some Factors Affecting the Absorption of Solar Radiation in Solar Stills". *Solar Energy*. 13, 373-381.
- Cooper P. I. 1973. "Heat and Mass Transfer Within a Solar Still Envelope". *ISES Congres. The Sun in the Service of Mankind. Part II, E49. Paris.*
- Dunkle R. V. 1961. "Solar Water Distillation: the Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still". *International Developments in Heat Transfer. ASME. Part V, sec. A*, 895-902.
- Fernández J. L. Z. 1988. "Destiladores solares de flujo continuo en circuito abierto". *Memoria del XIV Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C.* 218-222.
- Fernández J. L. Z. y Chargoy N. 1990. "Multi-Stage, Indirectly Heated Solar Still". *Solar Energy*. 44, 215-223.

Fernández J. L. Z. y Chargoy N. 1991a. "Destiladores solares de agua". Notas para el curso de actualización en Energía Solar. Laboratorio de Energía Solar, Temixco, Mor.

Fernández J. L. Z. y Chargoy N. 1991b. "Destiladores solares de agua para riego agrícola". Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, U.A. de Chapingo.

Fernández J.L.Z. 1987. "Introducción al estudio de los sistemas solares activos". Series del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M No. D-26.

Garg H. P. y Mann H. S. 1976. "Effect of Climatic, Operational and Design Parameters on the Year Round Performance of Single-Sloped and Double-Dloped Dolar Dtill Under Indian Arid Zone Conditions". Solar Energy, technical note. 18, 159-164.

Howe E.D. y Tleimat B.W. 1974. "Fundamentals of Water Desalination". Marcel Dekker Inc. 20, 431-465.

Incropera P.F. y DeWitt P.D. 1990. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". John Wiley & Sons. 3rd Edition.

— Kiatsiriroat T., Bhattacharya S.C. y Wibulswas P. 1986. "Prediction of Mass Transfer Rates in Solar Stills". Energy. 9, 881-886.

Kudish A. I. 1987. "Solar Energy in Agriculture". Water Desalination. 255-294.

Kumar A. y Tiwari G.N.. 1988. "Effect of Temperature Dependent Internal Heat Transfer on The Performance of a Solar Still". Int. J. Solar Energy. 6, 51-66.

Lawrence S. A., Gupta S. P. y Tiwari G. N. 1990. "Effect of Heat Capacity on the Performance of Solar Still With Water Flow Over The Glass Cover". Solar Energy. 30, 277-285.

Malik M.A.S., Tiwari G.N., Kumar A. y Sodha M.S. 1982. "Solar Distillation". Pergamon Press.

Martínez E.G., Poujol G.F.T. y Fernández J.L.F. 1995. "Estudio experimental de la convección natural en estado no permanente en una cavidad triangular". Memoria de la XIX semana nacional de energía solar. ANES-UABCS.

- McCracken H. y Porta M.A.G. 1990. "Solar Still Performance, La Paz and Alturas". Informe interno del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, A.C.
- Morse R. N. y Read W. R. W. 1968. "A Rational Basis for the Engineering Development of a Solar Still". *Solar Energy*. 12, 5-17.
- Nayak J. K., Tiwari G. N. y Sodha M. S. 1980. "Periodic Theory of Solar Still". *Energy Research*. 4, 41.
- Necati, Ö.M. 1985. "Heat Transfer (A Basic Approach)". McGraw-Hill. International Edition.
- Palacio A. y Fernández J. L. Z. 1993. "Numerical Analysis of Greenhouse-Type Solar Stills With High Inclination". *Solar Energy*. 50(6), 469-476.
- Porta M. A. G. y Fernández J. L. Z. 1993. "Experimental Evaluation of Thermal Inertia Effects in Diffusion-Type Solar Stills". *Memorie of the International Symposium of Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects*. Cancún, México.
- Porta M. A. G. y Fernández J. L. Z. 1994. "Experimental Evaluation of the Overall Top Heat Loss Coefficient in Direct Type Solar Stills". *Memorie of the 7th International Symposium on Transport Phenomena in Manufacturing Processes*. 294-298.
- Poulikakos D. y Bejan A. 1983. "Natural Convection Experiments in a Triangular Enclosure". *Technical note*. 105: 652- 655.
- Rajvanshi A. K. 1981. "Effect of Various Dyes on Solar Distillation". *Solar Energy*. 27, 51-65.
- Sharma V.B. y Mullick S.C. 1991. "Estimation Of Heat-Transfer Coefficients, the Upward Heat Flow, and Evaporation in a Solar Still". *Journal of Solar Energy Engineering*. 113, 36-41.
- Shawaqfeh A.T. y Farid M.M. 1995. "New Development in the Theory of Heat and Mass Transfer in Solar Stills". *Solar Energy*. 55, 527-535.
- Sodha M.S., Kumar A., Srivastava A. y. Tiwari G.N. 1980. "Thermal Performance of "Still on Roof" System". *Energy Conv. & Mgmt.* 20, 181-190.

- Spalding D.B. 1963. "Convective Mass Transfer". Arnold, London.
- Tamimi A. 1987. "Performance of a Solar Still with Reflectors and Black Dye". International Journal of Solar Energy. 5, 229-235.
- Tayeb A.M. 1992. "Performance Study of Some Designs of Solar Stills". Energy Conv. & Mgmt. 33, 889-898.
- Tiwari G.N. y Rao B.V.S.V. 1984. "Transient Performance of a Single Basin Solar Still With Water Flowing over The Glass Cover". Desalination. 49, 231-241.
- Tiwari G.N. y Lawrence S.A. 1991. "New Heat and Mass Transfer Relations For a Solar Still". Energy Convers. & Mgmt. 31, 201-203.
- Tiwari G.N., Gupta S.P. y Lawrence S.A. 1989. "Transient Analysis of Solar Still in the Presence of Dye". Energy Convers. & Mgmt. 29, 59-62.
- Tiwari G.N., Thomas J.M. y Khan E. 1994. "Optimization of Glass Cover Inclination for Maximun Yield in a Solar Still". Technical note. Heat Recovery Systems & CHP. 14, 447-455.
- Treybal, R.E. 1980. "Operaciones de transferencia de masa". McGraw-Hill. 2da. edición. México.
- Yadav Y. P. 1990. "Indoor Simulation of a Basin-Type Solar Still". Int. J. Solar Energy. 8, 31-40.
- Yadav Y. P. y Prasad Y. N. 1991. "Parametric Investigations on a Basin Type Solar Still". Energy Convers. Mgmt. 31, 7-16.